



HAL
open science

Comportement mécanique des roches : du laboratoire à l'ouvrage.

Muriel Gasc-Barbier

► **To cite this version:**

Muriel Gasc-Barbier. Comportement mécanique des roches : du laboratoire à l'ouvrage.. Mécanique [physics.med-ph]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2011. tel-00584240

HAL Id: tel-00584240

<https://theses.hal.science/tel-00584240>

Submitted on 7 Apr 2011

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

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

Rapport de synthèse présenté devant
l'Université Bordeaux I
en vue de l'obtention de l' Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité : Mécanique, Génie mécanique

par

Muriel Gasc-Barbier

**Comportement mécanique des roches :
du laboratoire à l'ouvrage**

Présentée le 4 février 2011 devant le jury composé de :

M. J. Sulem	<i>Directeur de recherche Paris Tech - Navier</i>	Président - Rapporteur
Mme V. Merrien-Soukatchoff	<i>Professeur à l'INPL</i>	Rapporteur
M. M. Vinches	<i>Maître assistant des Écoles des Mines</i>	Rapporteur
Mme J. Riss	<i>Professeur à l'Université de Bordeaux I</i>	Examineur
M. J.-L. Durville	<i>Membre du Conseil Général de l'Environnement et du développement durable</i>	Examineur

Travaux préparés au CETE-SO, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse

Sommaire

Avant propos	5
--------------------	---

Partie 1 : Parcours professionnel

1. Curriculum vitae détaillé.....	9
1.1. État civil, fonctions, diplôme	9
1.2. Activités d'encadrement de la recherche	11
1.3. Administration de la recherche	13
1.4. Partenariats	14
1.5. Activités connexes.....	16
2. Liste des publications et des travaux.....	17
2.1. En préparation :	17
2.2. Mémoire de thèse:	17
2.3. Soumis (revues).....	17
2.4. Publications (revues / Chapitre d'ouvrages).....	18
2.5. Publications (Actes de Congrès)	19
2.6. Communications sans publication.....	20
2.7. Liste des rapports	21

Partie 2 : Présentation des travaux de recherche

1. Introduction	25
2. Description du massif rocheux	26
2.1. Caractérisation du massif	27
2.1.1. Levé sur lignes de mesure	27
2.1.2. Levés sur carottes issues de forage	30
2.1.3. Levés sur imagerie de paroi	32
2.1.4. Travaux réalisés.....	33
2.2. Répartition géométrique des fractures	37
2.3. Représentativité des mesures	38
2.4. Synthèse partielle	38
3. Caractérisation en laboratoire	39
3.1. Description des dispositifs expérimentaux.....	39
3.1.1. Bâti pour la mesure des ondes élastiques :	39
3.1.2. Presse pour les essais mécaniques.....	40
3.2. Caractérisation mécanique de la matrice.....	42
3.2.1. Endommagement au cours d'essais mécaniques.....	44
3.2.2. Caractérisation de l'endommagement par méthodes acoustiques.....	50
3.2.3. Endommagement au cours de cycles de gel/dégel	53
3.2.4. Synthèse des méthodes de caractérisation de la matrice rocheuse employées.....	58
3.3. Essais sur les discontinuités	58
3.3.1. Mise au point de procédures expérimentales	58
3.3.2. Cisaillement sous contrainte normale constante (norme XP P94-424).....	60

3.3.3.	Autres trajets de chargement	64
3.3.4.	Influence de la rugosité des joints	67
3.4.	Synthèse partielle	70
4.	Comportement des ouvrages	72
4.1.	Modélisation	72
4.1.1.	Modèle simple : « classification des massifs rocheux »	72
4.1.2.	Modèle structural : prise en compte de la répartition statistique des fractures	74
4.1.3.	Modèle géomécanique : milieux discontinus Resoblok	75
4.1.4.	Modèle géomécanique : milieux discontinus Udec	77
4.1.5.	Modèle géomécanique : milieux discontinus LMGC	79
4.1.6.	Modèle géomécanique : milieux continus équivalents CESAR-LCPC	80
4.1.7.	Conclusion sur les modèles	82
4.2.	Instrumentation des ouvrages	82
5.	Conclusion	85
6.	Perspectives	86
6.1.	Description du massif rocheux	86
6.2.	Caractérisation en laboratoire	87
6.3.	Comportement des ouvrages	87
6.3.1.	Modélisation géomécanique	87
6.3.2.	Instrumentation d'ouvrage : suivi du creusement du tunnel de St Béat par interf�erom�etrie du champ sismique diffus	88
6.4.	Autres pistes à explorer	89
6.4.1.	Analyse du changement climatique	90
6.4.2.	Projet « terre crue »	90
6.4.3.	ANR Flash Haïti	91
7.	Bibliographie (autre que citée en 2)	92
8.	glossaire	97
Annexes		

Liste des figures

Figure 1 : Lignes de mesure réalisées à St Béat.....	29
Figure 2 : Coordonnées Aftès, d’après [Aftès, 2003]	29
Figure 3 : Procédé de levé de fracturation à l’aide d’une mire (Dezayes, 1996)	29
Figure 4 : Extrait d’un log résultant de l’imagerie optique –St Béat, forage SCH2	34
Figure 5 : Bâti utilisé pour la mesure des ondes élastiques.....	40
Figure 6 : Schéma de la presse en configuration a-uniaxiale et b-cisaillement	41
Figure 7 : Systèmes de mesure des déformations a- collier extensométrique b-jauge de déformation collée sur l’éprouvette	41
Figure 8 : Montage pour la mesure des ondes élastiques sous chargement mécanique.....	42
Figure 9 : Schéma de la courbe contrainte-déformation d’une roche soumise à une compression (Jaeger et Cook 1979).	43
Figure 10 : Carottes de gneiss de Valabres	44
Figure 11 : Vitesses des ondes P en fonction de l’orientation de la foliation de la roche par rapport à l’axe de la carotte	45
Figure 12 : Courbe contrainte/déformation caractéristique des essais uniaxiaux avec mesures des vitesses	46
Figure 13 : Valeurs des modules statiques mesurés à la décharge en GPa	47
Figure 14 : Photos de 2 éprouvettes après essais a- R637 préparée perpendiculairement b- R633, carottée parallèlement à la foliation	47
Figure 15 : Valeurs des modules dynamiques calculés, en GPa.	48
Figure 16. Évolution de la vitesse des ondes P sous 5MPa de confinement.....	49
Figure 17. Évolution de la vitesse des ondes P sous 5MPa de confinement.....	50
Figure 18 : Historiques de chargement (en bleu) et activités acoustiques (en rouge) durant les compressions uniaxiales de deux échantillons (R633, // à gauche et R637 \perp , à droite).....	51
Figure 19. Courbes contrainte-déplacement (en bleu) et localisation des hypocentres des événements d’EA durant les compressions uniaxiales, R633 // à gauche et R637 T à droite	51
Figure 20 : Fracturation macroscopique sub-verticale post-rupture de l’échantillon R633 (foliation sub-parallèle à σ_1) et localisation des hypocentres.....	52
Figure 21 : Évolution des vitesses moyennes de propagation des ondes - grès.....	54
Figure 22 : Évolution des spectres de fréquence pour la carotte R 748 – grès des Vosges a- Vp, b-Vs1, c- Vs2.....	55
Figure 23 : Évolution des énergies en fonction des cycles – Grès des Vosges.....	56
Figure 24. Exemple de joint de calcaire scellé en place, essai réalisé au LRPC de Toulouse a-vue de dessus demi-boîte inférieure uniquement, b- vue de côté, joint en place.....	59
Figure 25 : Comportement à la compression simple d’une discontinuité naturelle de gneiss	59
Figure 26 : Réponse d’un joint naturel à un essai de cisaillement a- courbe contrainte/déformation, b- courbe de dilatance.....	61
Figure 27 : Proposition d’enveloppe de rupture et résiduelle – gneiss de Valabres	62
Figure 28 : Comparaison courbe expérimentale / modèle - courbe contrainte / déplacement [Ar9].....	63
Figure 29. Influence de la vitesse de cisaillement sur la contrainte au pic	63
Figure 30. Évolution de la rigidité tangentielle en fonction de la contrainte normale et de la vitesse de cisaillement.....	64
Figure 31 : Exemple de mobilisation de blocs rocheux [Zhao 2008] ; a- les essais CNC représentent bien un glissement sous son propre poids, b- les essais KNC rendant mieux compte de mouvements contraints au sein de roche fissurée.....	65
Figure 32 : Chargement de l’essai à déplacement normal constant – gneiss de Valabres.....	65

Figure 33 : Essai à rigidité constante pour une contrainte normale initiale imposée de 5 MPa. a- contrainte tangentielle en fonction du déplacement tangentiel, b- Courbe de dilatance	66
Figure 34 : Essai de cisaillement de type oedométrique – gneiss de Valabres a- Trajet de chargement b-Réponse	67
Figure 35 : Morphologie de l'éponte inférieure d'un joint de marbre [Ac18].....	68
Figure 36 : Définition des colatitudes 2D et 3D.	69
Figure 37 : Localisation des zones de contact (en noir) de joints naturels de marbre de St Béat soumis à un cisaillement sous contraintes normales de 30 kN (a), 20 kN (b) and 10 kN (c) .	70
Figure 38. Exemple de calculs Resoblok [Ar8]	76
Figure 39. Exemple de calculs Resoblok [Ac9].....	77
Figure 40. Iso-valeurs des déplacements verticaux autour de la pile du viaduc sur le Viaur pour un effort de traction de 63 MPa, calculs UDEC [Ac11].....	78
Figure 41. Exemple de modèle de terrain réalisé avec Resoblok (vallée du Viaur)	78
Figure 42. Coupes Udec (longitudinale et axiale) du massif de St Béat, réalisées à partir de simulations Resoblok	79
Figure 43. Modélisation des talus du Pallat réalisée à l'aide de LMGC90 [Rafiee et al. 2009]	79
Figure 44 : Comparaison milieu continu équivalent / milieu discontinu – représentation de la contrainte de cisaillement au niveau d'un des déblais d'Ax-les-thermes	81
Figure 45 : Prise en compte de la topographie du site de St Béat.....	81
Figure 46 : Implantations GPS des désordres et des cibles sur le MNT du versant	83
Figure 47 : Schéma d'implantation des sondes dans la galerie du château - St Béat (Inéris) .	89
Figure 48 : Localisation des principaux sites d'étude	99
Figure 49 : Village de St Béat – positionnement de l'axe du futur tunnel et position actuelle de la route. <i>Photo Vincent Constant</i>	100
Figure 50 : Tracé du tunnel.	101
Figure 51 : Carte IGN de la zone des lacets du Pallat.....	102
Figure 52 : Photo des lacets du Pallat	103
Figure 53 : déviation d'Ax-les-Thermes	104
Figure 54 : Photo des déblais rocheux en cours de réalisation et exemple de ligne de mesure exploitée	105
Figure 55 : Photo des déblais rocheux réalisés	105
Figure 56 : Photo du Viaduc sur le Viaur.	106
Figure 57 : �boulement du 20 mai 2000 – Photo A. Calvino (LRPC Nice).....	107

Liste des tableaux

Tableau 1 : Stagiaires encadrés depuis 2003.....	11
Tableau 2 : Synthèse des publications et rapports rédigés.....	17
Tableau 3 : Synthèse et importance des biais répertoriés entre levés sur carottes et imageries de paroi.....	37
Tableau 4 : Synthèse des essais réalisés sur les gneiss de Valabres	45
Tableau 5 : Propriétés des critères de Coulomb proposés pour le gneiss de Valabres	62
Tableau 6 : avantage et inconvénients des modèles.....	82

Avant propos

Mon poste de chargée de recherche est placé au sein d'une ERA (Équipe de Recherche Associée). Je suis donc agent du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (MEEDDM). En cela je fais de la recherche appliquée, en lien direct avec l'ingénierie de terrain. Compte tenu du caractère « particulier » de cette position, il me paraît important de développer un peu le contexte de mon travail.

Les ERA sont donc des équipes de recherche associées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Elles sont localisées au sein des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) pour avoir un lien direct avec les sites et ouvrages de la zone d'action du laboratoire concerné. En ceci, leur rôle est de faire le lien entre les avancées de la recherche et la mise en pratique sur le terrain, et de faire remonter au niveau central, des problématiques concrètes.

L'ERA du LRPC de Toulouse est l'ERA 01 ; elle est spécialisée dans le « Comportement mécanique des roches », depuis 2003, ce qui correspond également à mon arrivée au laboratoire. Auparavant, les membres travaillaient essentiellement sur les sols mous et les stabilités de remblais. Je suis la responsable de l'ERA qui est composée en sus de moi de trois ingénieurs (deux sont docteurs et le troisième doit soutenir en septembre 2010), quatre techniciens et une doctorante. Tous les membres, sauf la doctorante, ne sont affectés qu'à temps partiel à l'ERA (entre 30 et 50 % de leur temps) et font de l'opérationnel de type « ingénierie publique » le reste de leur temps.

Les actions de recherche de l'ERA s'inscrivent dans le cadre d'opérations de recherche pluriannuelles (4 ans) menées par le LCPC et contractualisées sous forme de contrats quadriennaux. En 2009 notre ERA a été évaluée par l'AERES conjointement avec l'unité du LCPC dont elle dépend (unité MSRGI : Mécanique, des sols, des roches et géologie de l'ingénieur).

Ainsi mon activité est fortement liée aux orientations données par le LCPC d'une part et, d'autre part, aux ouvrages et sites sur lesquels le LRPC de Toulouse est amené à intervenir. C'est donc une richesse de par la diversité des problèmes à traiter et les différents sites d'étude qui sont alors à ma disposition.

Avant de développer plus précisément mes activités scientifiques, je vais revenir rapidement sur mon parcours.

Partie 1

Parcours professionnel

1. Curriculum vitae détaillé

1.1. État civil, fonctions, diplôme

1.1.1. Etat civil

GASC Muriel née Barbier
née le 26/12/1973
mariée, 4 enfants

courriel : muriel.gasc@developpement-durable.gouv.fr
tel (B): 05-62-25-97-61

1.1.2. Diplômes

2002 : Doctorat de l'Université Paris VI (Géosciences et ressources naturelles), préparé au G3S/LMS de l'École Polytechnique (Palaiseau). *Mention très honorable*.

Titre du mémoire : « Étude des mécanismes de déformation de roches argileuses profondes ; apport de la microstructure et des analyses pétrophysiques »

Soutenue le 25 septembre 2002 devant le jury composé de :

G. Calas	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie</i>	Président du jury
A Gens	<i>Professeur à l'Université Polytechnique de Catalogne</i>	rapporteur
G. Vasseur	<i>Directeur de recherche au CNRS</i>	rapporteur
G. de Marsily	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie</i>	directeur de thèse
M. Ghoreychi	<i>Délégué Scientifique à l'INERIS</i>	Co-directeur
P. Bérest	<i>Directeur de recherche à l'École Polytechnique</i>	examineur
D. Tessier	<i>Directeur de recherche à l'INRA</i>	examineur invité
P. Lebon	<i>Adjoint au Directeur Scientifique de l'ANDRA</i>	examineur invité

1996 : Ingénieur en Géophysique - Géotechniques de l'IST (Université Paris VI). *Mention bien*

1.1.3. Fonctions exercées

LRPC (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées) : *depuis septembre 2003*

Chargée de recherche. Responsable de l'ERA 01 « comportement mécanique des roches ». **Thèmes de recherche** : Comportement mécanique des massifs fracturés : approche expérimentale et théorique, analyse et modélisation de la fracturation, étude des biais induits. Physique des roches : propagation des ondes élastiques et émission acoustique.

Contrats de recherche avec le LCPC, le SETRA et le CETU. Participation à projets ANR et européens (SudOE).

Réponses à appels d'offres ANR - études contractuelles pour DDE.

Cours d'initiation à la mécanique des sols à l'ENSEEIH (20h/an).

Interventions dans le Master 3GCE (Bordeaux) et École d'ingénieur de Poitiers (6h/an)

Production scientifique : 8 articles ou chapitres, 15 communications avec actes

G.3S (Groupement pour l'étude des Structures Souterraines de Stockage) : *1998- 2003*

Ingénieur de recherche. étude de la **rhéologie des argiles**. Clients : Andra, Elf, IPSN.

Mise au point, suivi et interprétation d'essais chimico-hydro-géo-mécaniques et proposition d'une loi de comportement viscoplastique.

Détachée pendant 5 mois au service géomécanique de l'Andra (analyse et suivi d'études, etc...)

En parallèle au travail d'ingénieur, préparation d'une thèse de doctorat (1999-2002) « étude des mécanismes de déformation de roches argileuses profondes : Apport de la microstructure et des analyses prétophysiques ». Directeurs de thèse **G. de Marsily** (Paris VI) et **M. Ghoreychi** (Inéris)

Production scientifique : 1 thèse de doctorat, 3 articles, 6 communications avec actes

INTAKTA France (Conseil scientifique en environnement). *nov. 1997 - juin 1998* :

Ingénieur d'étude. études, appels d'offre : stockage de déchets toxiques, études d'impacts, toxicologie, transport des polluants, études et participation à des formations sur les ACV.

SIMECSOL (Bureau d'étude en géotechnique). *CDD : août - oct. 1997* :

Tests du logiciel FLAC et analyse des pistes potentielles d'utilisation.

Modélisation de structures géologiques pour l'industrie pétrolière.

EPFL (école Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse), *nov. 96 - juill. 97*:

Ingénieur au **Laboratoire des Matériaux de Construction**. Responsable d'une étude portant sur les phénomènes acoustiques dans les rails de tramways pour les Transports Publics Genevois.

G.3S *Stage de fin d'études (6 mois), mars - août. 1996 + CDD (2 mois)*:

Sujet: « Modélisation de l'essai oedométrique en régime transitoire. Application au cas des argiles à grande profondeur ».

Production scientifique : 1 article, 2 communications avec actes, 1 sans actes

1.2. Activités d'encadrement de la recherche

1.2.1. Encadrement de stagiaires / post -doct, (encadrant principal)

Depuis mon arrivée au LRPC de Toulouse (en 2003) j'ai encadré ou co-encadré une douzaine de stagiaires. Pour plus de lisibilité, le Tableau 1 reprend le nom du stagiaire et son niveau d'étude, ainsi que l'année et la durée et le sujet du stage.

Tableau 1 : Stagiaires encadrés depuis 2003

nom	année	Durée du stage	Diplôme	Sujet de stage
Emilie Evrard	2005	3 mois	M1 IUP de Toulouse	Durabilité des sols renforcés à la chaux
Baptiste Rousseau	2005	2 mois	M1 3GC, Univ de Bordeaux 1	Étude statistique des discontinuités du talus rocheux du Pallat (<i>co-encadrement avec J. Riss et A Marrache</i>)
Alexia Ballion	2006	6 mois	M2 rech. et 5ème année ENISE	Étude de la stabilité de déblais rocheux fracturés renforcés
Vincent Constans	2006	2 mois	M1 ENSG Nancy	Analyse comparée de la fracturation obtenue sur carotte et par diagraphies
Baptiste Rousseau	2006	6 mois	M2 MSROE, École centrale Paris, Univ de Bordeaux 1	Fracturation d'un talus rocheux et comportement au cisaillement de deux fractures : exemple d'Ax les Thermes (<i>co-encadrement avec J. Riss et A Marrache</i>)
Jérôme Wassermann	2006	3 mois	Post-doctorat	étude de l'émission acoustique de gneiss lors de leur sollicitation mécanique
Emilie Arnaud	2007	3 mois	L3 IUP de Toulouse	étude de l'endommagement des roches par méthodes acoustiques
Maxime Catillon	2007	6 mois	M2 rech. et 5ème année ENISE	Caractérisation géomécanique d'un gneiss pyrénéen
Mathieu Escalier	2008	3 mois	M1 IUP de Toulouse	Étude de l'endommagement des roches par méthodes ultrasoniques
Stéphanie Mahé	2008	6 mois	M2 pro, Univ de Clermont Ferrand	Pratiques du RST dans les problématiques de mouvements rocheux
Ingrid Munoz	2010	6 mois	M2 pro, Univ de Clermont Ferrand	Modélisation numérique du comportement des tunnels

1.2.2. Encadrement de thèse

2006-2010 : Fabrice Rojat. Dimensionnement des tunnels dans des roches de faibles caractéristiques mécaniques ; Université de rattachement : ENPC – Paris Tech ; Directeur de thèse ; Ph. Mestat ; rôle : participation au comité de suivi de thèse et soutien de proximité (F. Rojat est membre de l'ERA). *Taux d'encadrement : 20%*.

Soutenance programmée pour le 24 novembre 2010.

2007-2010 : Thi Than Nhan Hoang : Étude du comportement d'un milieu rocheux fracturé – application à la réalisation du tunnel de St Béat (31) ; Université de rattachement : ENPC – Paris Tech ; Directeur de thèse J. Sulem (ENPC-Navier). Rôle : co-direction, encadrement de proximité. *Taux d'encadrement : 70%*

Soutenance programmée pour le 8 décembre 2010.

2010- 2013 : Stéphanie Mahé. « Étude de la fracturation d'un massif rocheux aux abords d'une faille d'échelle crustale. Aspects géologiques et mécaniques et conséquences sur le creusement d'un tunnel routier » Université de rattachement : Université de Montpellier. Directeur de thèse A. Chauvet, co-directeur M. Vinches. Rôle : conseiller d'étude, encadrement de proximité. *Taux d'encadrement estimé : 60%*

2010- 2013 : Thi Thu Hang Tran. « Application combinée de la géologie structurale, de la mécanique des milieux discrets, et de l'analyse de contraintes et déplacements *in situ* à la modélisation du comportement mécanique de massifs rocheux fracturés » Directeur de thèse M. Vinches (École des Mines d'Alès). Rôle : participation au comité de suivi de thèse – encadrement de proximité pour la réalisation d'essais en laboratoire et sur site. *Taux d'encadrement estimé : 20%*

J'ai également participé aux travaux de thèse de :

Ali Rafiee : thèse de l'université de Montpellier, soutenue en juin 2008 : le travail de thèse portait sur la modélisation des massifs fracturés à l'aide du logiciel de contact LMGC90. Un des cas d'application intéressant de ce travail a été le massif du Pallat, dans les Pyrénées Orientales. Ali a reconstruit la géométrie du site en collaboration, à partir des données de terrains fournies et de visite du site. Nous avons un projet de communication commune pour le prochain ISRM [Ac23].

Jérôme Duriez : thèse de l'université de Grenoble, soutenance en novembre 2009 : cette thèse portait sur la modélisation des massifs fracturés en utilisant une loi incrémentale non linéaire pour le comportement des joints. La calibration de cette loi demande la réalisation d'essais de cisaillement sur discontinuité selon des chemins de chargement particuliers. Ces essais ont été préparés en collaboration étroite et réalisés au LRPC de Toulouse. 1 article commun : Ar10.

1.2.3. Enseignement

Depuis 2003 : Responsable des cours de mécanique des sols à l'ENSEEIH (École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications) : 20 heures de cours d'initiation à la mécanique des sols destinées aux

étudiants de 3^{ème} années de l'école d'ingénieur spécialité « sciences de l'eau » et au Master recherche « Hydrologie, Hydrochimie, sol, Environnement ». Responsable de la définition du contenu du cours, participation aux réunions de filière.

Depuis 2008 : 6 heures de conférence dans le master 2 3GCE de l'université Bordeaux 1. Présentation du projet de tunnel de St Bât : cadre administratif, reconnaissances géologiques et géotechniques, apports de ces données pour la recherche.

Depuis 2009 : 4 heures en 3^{ème} année de l'école d'ingénieur de Poitiers (section génie Civil). Présentation du projet de tunnel de St Bât : cadre administratif, reconnaissances géologiques et géotechniques.

1.3. Administration de la recherche

1.3.1. Au sein de l'ERA

Le poste de chercheur créé au laboratoire de Toulouse avait à la fois pour but de renforcer l'équipe de recherche afin d'assurer la fin de sa mise en restructuration et sa gestion future. Cet aspect a occupé 20 à 30% de mon temps environ, pendant les 2 premières années (2003-2005). En effet, il a fallu préparer l'évaluation de l'ERA qui s'est déroulée avec succès en mars 2005, ainsi que proposer un programme quadriennal cohérent avec les attentes du LCPC, qui a donc été validé. Ce travail a nécessité une adaptation des personnels à la thématique « roche » et « l'appropriation » et surtout la mise en valeur de nouveaux dispositifs expérimentaux qui n'étaient pas encore très utilisés. La presse de mécanique des roches, présentée en 3.1, a, par exemple, été acquise en 2002, et seul un essai de cisaillement et aucun essai triaxiaux n'avaient été réalisés avant mon arrivée.

En dehors de ces périodes de renouvellement, la gestion administrative de l'ERA est beaucoup plus légère. Elle consiste essentiellement à préparer annuellement les réponses aux programmes de recherche du LCPC, sous forme de « fiches de recherche », assurer le suivi des différentes opérations auprès des membres de l'ERA, ainsi que permettre à chacun des membres de dégager du temps des activités opérationnelles pour le consacrer à la recherche, et c'est sans doute une des parties les plus délicates de mon travail.

L'ERA est actuellement en cours de renouvellement, et vient d'être auditionnée par l'AERES en tant que section décentrée de l'unité MSRGI (Mécanique des sols, des roches et géologie de l'ingénieur) du LCPC. J'ai donc participé à la rédaction des différents documents nécessaires à l'évaluation. Un nouveau contrat quadriennal propre à l'ERA doit être rédigé à la fin de l'année 2010.

1.3.2. Projets ANR et Européens

J'ai également initié des partenariats pour répondre à des appels d'offre de l'ANR, mais notre projet s'est vu refusé 2 années de suite. Il n'a ensuite pas été re-soumis car il était lié au démarrage d'un grand chantier dans la région (déviations d'Ax-les-Thermes). En 2006, le

projet Fracas (Analyses des instabilités d'un massif rocheux fracturé en lien avec un risque sismique - FRACtures Analysis with Seismicity) regroupait 6 partenaires : le LRPC de Toulouse, le GHYMAC de l'université Bordeaux 1, Armines (centre de l'École des Mines d'Alès), le CEA, le LAEGO (Nancy) et l'Inéris. Il a été soumis dans l'appel à projet « Catastrophes naturelles et Tsunami ». En 2007 le projet MoMaTal (Modèle pour un management de talus en minimisant les risques) a été soumis dans l'appel à projet PGCU ; il regroupait alors 7 partenaires : le LRPC de Toulouse, le GHYMAC de l'université Bordeaux 1, Armines (École des Mines d'Alès), le LCPC, le LAEGO (Nancy), l'Inéris et la société ATM3D, spécialisée dans le lever scanner en 3D.

Je suis responsable de la participation du LRPC de Toulouse dans le projet ANR Stabrock (impact des changements climatiques sur la STABilité des fronts ROChoux : observation, expérimentation et modélisation) qui couvre la période 2006-2010.

J'ai participé à la rédaction d'un projet européen en cours de soumission (HEAVEN – natural Hazards and coastal Erosion : Assessment, Vulnerability and EconNomic impact : atlantic coast of europe).

Enfin, je suis la correspondante du LRPC de Toulouse et plus généralement du CETE du Sud-Ouest pour un projet qui vient d'être soumis dans le cadre de l'appel d'offre ANR flash Haïti. Ce projet, « KAL-Haïti », est à l'instigation du CNES. Il a pour but de proposer la création d'une base de donnée Recherche pour la gestion du risque et la reconstruction durable en Haïti. Nous y reviendrons dans les perspectives de ce travail.

1.3.3. Au sein du Réseau Scientifique et Technique du MEEDDM

J'ai été à l'instigation de la convention tripartite CNAM- CETU- LRPC de Toulouse qui a conduit aux études sur les biais induits par les méthodes de levers de la fracturation [soum1], [Ac17].

Je suis responsable d'une action (mouvements rocheux) dans l'opération de recherche « Maîtrise des risques de mouvements de terrain en zone urbaine ou sensible » du LCPC qui se déroule sur la période 2009-2013.

1.3.4. Autre

Je suis à l'instigation de deux conventions de recherche bi et tripartite qui débutent en 2010 :

- Avec l'Inéris pour initier un projet de caractérisation in situ d'un massif rocheux par la méthode du bruit sismique (développé en 4.3) ;
- Avec la Dréal Midi-Pyrénées et Armines (École des Mines d'Alès), pour co-encadrer le travail de thèse de S. Mahé, dans le cadre du creusement du tunnel de St Béat.

1.4. Partenariats

L'ERA étant une petite équipe de recherche, il était nécessaire à mon avis, pour pouvoir progresser de travailler en collaboration avec différentes équipes, et pas uniquement notre équipe de tutelle du LCPC. J'ai été ainsi à l'instigation de différents partenariats.

1.4.1. Université de Bordeaux

Je me suis tournée dès 2004 vers l'Université de Bordeaux qui a une équipe et une compétence internationalement reconnue sur la thématique du comportement des joints rocheux. Les premiers contacts pris avec J. Riss et A. Marache se sont rapidement concrétisés par l'encadrement d'un stagiaire commun (B. Rousseau, février 2005 et février-juin 2006) et 2 communications [Ac6] et [Com12]. Les travaux ont porté sur les essais en laboratoire et sur la représentation statistique des fractures dans l'espace.

Nous avons ensuite poursuivi cette collaboration lors de la thèse de Nhan Hoang (soutenance le 8 décembre 2010) par l'analyse morphologique des joints rocheux, en combinant des techniques disponibles pour partie à Toulouse (essais mécaniques de cisaillement sur discontinuités naturelles) et pour partie à Bordeaux (profilomètre laser et analyse des données morphologiques). Cette collaboration a donné lieu à d'autres communications : Ar18, Ar19, AR21, et il est également prévu d'écrire deux articles de synthèse, une fois le mémoire de thèse achevé. Les perspectives proposées par ce travail sont très intéressantes, et je souhaiterais poursuivre cette collaboration au-delà de la thèse de N. Hoang, par la réalisation d'autres projets communs d'une part sur le comportement mécanique des discontinuités rocheuses et d'autre part sur la caractérisation structurale du massif.

1.4.2. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Un lien naturel existe avec la division MSRGI (aujourd'hui GER2) du LCPC, en particulier dans le domaine des risques rocheux, des cavités souterraines et des outils de calculs. Plus précisément, avec A. Pouya et E. Dimnet pour ce qui touche aux risques rocheux ; avec P. Alfonsi pour les aspects liés à la modélisation des milieux fracturés [Ac11] ; avec P. Mestat et E. Bourgeois pour l'utilisation de CESAR-LCPC dans le cadre de la thèse de F. Rojat, et bien entendu J.Sulem (UMR Navier) qui a dirigé la thèse de Nhan Hoang.

1.4.3. Écoles des Mines

La collaboration avec V. Merrien-Soukatchoff de l'école des Mines de Nancy s'est mise en place à travers différents projets de recherche (Stabrock et projets ANR non retenus) ainsi que par la mise à ma disposition de Resoblok, un logiciel de calcul par bloc développé en interne au Laego, et qui permet de faire des analyses statistiques de stabilité des massifs en 3D. Nous avons travaillé ensemble essentiellement sur les aspects liés à la modélisation des massifs [Ar7, Ac15].

La collaboration avec M. Vinches de l'école des Mines d'Alès, s'est, elle, tout d'abord traduite par un échange de données et de moyens de calculs numérique à l'aide du logiciel LMGC lors de la thèse d'A. Rafiee. Ces travaux ont été prolongés par la participation conjointe de deux projets de thèse engagés respectivement en mars et novembre 2010 (T.T.H. Tran et S. Mahé).

1.4.4. Université de Toulouse

La collaboration avec des membres des laboratoires de l'université de Toulouse est plus récente, car sur des thématiques plus nouvelles. Je citerai essentiellement J.-E. Aubert avec qui nous sommes en train de monter un projet sur l'utilisation de la terre crue dans les bâtiments.

1.4.5. Inéris

Les contacts avec l'Inéris ont été initialement pris dans le cadre du projet national Stabrock, grâce auquel j'ai pu travaillé avec J. Wasserman (maintenant à l'IRSN) sur les aspects liés aux émissions acoustique.

J'ai ensuite pris contact avec une seconde équipe (P. Bigarré – E. Klein) pour travailler sur le bruit de fond microsismique et l'instrumentation du terrain, avec application au tunnel de St Béat (voire le paragraphe final sur les « perspectives »).

1.4.6. Autre

Dans le cadre de la convention CNAM- CETU- LRPC de Toulouse, évoquée plus haut, j'ai également été amenée à travailler avec ces 2 organismes (essentiellement O. Fouché au CNAM et C. Gaillard au CETU) sur les biais induits par les méthodes de levers de la facturation.

Dans le cadre du projet Stabrock, j'ai également travaillé avec F. Darve pour la réalisation de programmes expérimentaux dans le cadre du travail de thèse de J. Duriez.

1.5. Activités connexes

En tant que membre du LRPC je participe également à différentes études opérationnelles et parfois relativement éloignées de mon travail de recherche. Je citerai entre autre l'étude de tracé de la rocade Est de Narbonne. J'ai été responsable de la planification du suivi et des calculs au niveau « études » du tracé de cette rocade sur sols compressibles, puis de l'assistance à l'écriture et la relecture du CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) en ce qui concerne la mise en place de drains dans les sols compressibles.

J'ai également participé à différentes études ou expertise de géotechnique classique, en particulier concernant les gonflements importants survenus en fin de chantier qui étaient dus à la présence de gypse, ou quelques études ponctuelles d'instabilités de versants.

2. Liste des publications et des travaux

Le Tableau 2 synthétise l'ensemble des rapports et publications rédigés. Il ne reprend pas les articles en cours de rédaction.

Tableau 2 : Synthèse des publications et rapports rédigés

	Avant 2003	Depuis 2003
Chapitres d'ouvrage		3
Articles	3	7 (+2 soumis)
Actes de congrès	7	15
Communications sans publications	5	4
Rapports de recherche et d'étude	11	26
Review		1

2.1. En préparation :

N. Hoang, Muriel Gasc-Barbier, Didier Virely, Jean Sulem, **Mechanical behavior of a natural marble – from laboratory to numerical analysis** pour RMRE
N. Hoang, Muriel Gasc-Barbier, Jean Sulem, Antoine Marache, Joëlle Riss **Mechanical behavior of natural marble discontinuities under shear tests** pour IJRM
N. Hoang, Antoine Marache, Muriel Gasc-Barbier, Joëlle Riss, Jean Sulem, **Importance of morphological analysis on shear test on natural marble discontinuities** pour IJRM
M. Gasc-Barbier, D. Virely : **New loading path and laboratory procedures to study the shear behavior of rocks** pour *Int Testing J. ASTM*
J. Wasserman, M. Gasc-Barbier : **Damage localization during compressions of anisotropic rocks.** pour *Geophysical Journal International*
J.E. Aubert, M. Gasc-Barbier, **Hardening of soil blocks during freezing and thawing cycles** pour *Applied clay sciences*

2.2. Mémoire de thèse:

[Th] M. Gasc-Barbier : Étude des mécanismes de déformation de roches argileuses profondes ; apport de la microstructure et des analyses pétrophysiques. Thèse de l'université Paris VI. Spécialité Géosciences et Ressources Naturelles. *Soutenue le 25 septembre 2002*

2.3. Soumis (revues)

[Soum2] M. Gasc-Barbier, J. Wasserman : **Étude de l'anisotropie des roches par méthode ultrasonique – Application au gneiss de Valabres (06)** soumis à la RFG en octobre 2010. *En attente des relecteurs*

[Soum1] O. Fouché, M. Gasc-Barbier, C. Gaillard : **Uncertainty in sampling the fracture network from cores and borehole images _ Saint-Béat marbles (Garonne River, France).** *Int. J. of Rock Mech. En cours de prise en compte des remarques des reviewers.*

2.4. Publications (revues / Chapitre d'ouvrages)

[Ar13] V. Merrien-Soukatchoff, J. Duriez, M. Gasc-Barbier, F. Darve, F. Donzé - **Mechanical stability analysis of fractured rock slopes.** Chapitre 3 du traité Rockfall engineering book. Nicot F. et Lambert S. ed. *Hermès Sc. Publications.* à paraître (4^{ème} trimestre 2011)

[Ar12] M. Gasc-Barbier, O. Fouché, C. Gaillard : **Étude comparée de la fracturation observable sur carottes de forage et obtenue par diagraphie – application au marbre de St Béat (31) RFG accepté.**

[Ar11] M. Gasc-Barbier, A. Marache : **Comportement mécanique des joints rocheux.** *Géomécanique des instabilités rocheuses : du déclenchement à l'ouvrage, chapitre 4.* Traité MIN - Collection Risques Naturels. Nicot F. et Lambert S. ed. *Hermès Sc. Publications.* à paraître (4^{ème} trimestre 2010)

[Ar10] J. Duriez, F. Darve, F.-V. Donzé, M. Gasc-Barbier : **Prédire les chutes de blocs, une approche mécanique.** *Géomécanique des instabilités rocheuses : du déclenchement à l'ouvrage, chapitre 6.* Traité MIN - Collection Risques Naturels. Nicot F. et Lambert S. ed. *Hermès Sc. Publications* à paraître (4^{ème} trimestre 2010)

[Ar9] M. Gasc-Barbier, J. Guittard : **Comportement au cisaillement d'un joint rocheux naturel.** *Revue Française de Géotechnique (2009), n°128, pp 5-9*

[Ar8] M. Gasc-Barbier, A. Ballion, D. Virely : **Design of large cuttings in jointed rock.** *Bull. of Engineering Geology and the Environment. 67 n°2 (2008) pp 227-235*

[Ar7] V. Merrien-Soukatchoff, M. Gasc-Barbier, T. Korini : **Influence from Geomodelling of a fractured rock mass on the mechanical assessments.** *Felsbau 25 (2007), n°4, pp 8-11*

[Ar6] M. Gasc-Barbier, D. Tessier : **Structural modifications of a hard deep clayey rock due to hygro-mechanical solicitations.** *International Journal of Geomechanics ASCE, 7 n°3 (2007) 227-235*

[Ar5] M. Gasc-Barbier, S. Chanchole : **De l'utilisation d'échantillons humides en porosimétrie mercure.** *Revue Française de Géotechnique, 111 (2005) 77-83*

[Ar4] M. Gasc-Barbier, S. Chanchole, B. Lecampion, P. Bérest : **Study of the creep behaviour of Bure clayey rock.** *Applied Clay Sciences 26 (2004) 449-458*

[Ar3] M. Gasc-Barbier, S. Chanchole, P. Bérest, K. Su : **Comportement à long terme des argilites de l'Est.** *Bilan études et Travaux 2002. Publication Andra*

[Ar2] M. Gasc-Barbier, Ph. Cosenza, M. Ghoreychi, S. Chanchole et D. Tessier : **Conception d'un essai triaxial à succion contrôlée : Mesure des déformations.** *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des planètes 330 (2000) 97-103*

[Ar1] I. Djéran-Maigre, M. Gasc-Barbier : **Hydro-mechanical modelling of experimentally compacted porous media.** *Transport in Porous Media. 41 (2000) 81-103*

2.5. Publications (Actes de Congrès)

- [Ac23] A. Rafiee, M. Gasc-Barbier, M. Vinches : Stochastic model generation for discontinuous rock mass media and numerical analysis using the NSCD method (Case study: Saint-Béat tunnel in the southwest of France). ISRM 2011 Pékin. *Sous presse*.
- [Ac22] M. Gasc-Barbier, P. Alfonsi : **Open fractures on rock slopes: experimental and numerical analysis** symposium Rock Slope Stability -RSS2010-24 – 25 novembre 2010, Paris *CD-Rom*.
- [Ac21] A. Marache, J.Riss, N. Hoang, M. Gasc-Barbier, M. Loubaud : **Apport de la statistique multidimensionnelle à la classification de joints rocheux**. JNGG 2010, pp. 127-134.
- [Ac20] H. Palhol, F. Rojat, S. Rucquoi, M. Gasc-Barbier : **Évaluation de l'impact du changement climatique sur le risque mouvement de terrain**. JNGG 2010. pp 875-882.
- [Ac19] N. Hoang, M. Gasc-Barbier, J. Sulem, A. Marache, J. Riss : **Mechanical behaviour of natural marble discontinuities**. Eurock 2010. *pp 215-218*
- [Ac18] N. Hoang, A. Marache, M. Gasc-Barbier, J.Riss, J. Sulem : **Morphological analysis of natural marble discontinuities** Eurock 2010. *pp 199-202*
- [Ac17] M. Gasc-Barbier, O. Fouché, C. Gaillard : **Comparison between cores and borehole images on the fracture networks knowledge** Eurock 2009, Dubrovnik, Cavtat, Croatie – 29-31 octobre 2009. *pp 109-114*
- [Ac16] N. Hoang, M. Gasc-Barbier, J. Guittard, V. Gendre : **Caractérisation de la matrice et des discontinuités naturelles d'un massif rocheux fracturé**. 27^{ème} rencontres AUGC, 3-5 juin 2009, St Malo. (*AUG 02-50*)
- [Ac15] J. Godeffroy, V. Merrien-Soukatchoff, M. Gasc-Barbier : **Stabilité de pentes rocheuses fracturées. Recherche des conditions aux limites pour un calcul à l'équilibre limite 3D**. 27^{ème} rencontres AUGC, 3-5 juin 2009, St Malo. (*AUG 03-20*)
- [Ac14] D. Virely, M. Gasc-Barbier, A. Ballion : **Ax-les-Thermes: Rockslide risk in large cuttings above a highway in seismic zone**. *Congrès mondial de la route 17-21 sept 2007. Paris..* Présentation sur stand + CD-Rom
- [Ac13] G. Senfaute, F. Darve, C. Duner, M. Gasc, Y. Gugliemi, F. Laouafa, H. Lançon, J. Mudry, A. Pouya, V. Soukatchoff : **Impact of climate change on rock slope stability: field observation, monitoring and modelling**. *International Conference on landslide and climate change*, 21-24 mai 2007. Ile de Wight, UK
- [Ac12] A. Marache, J. Riss, B. Rousseau, D. Virely, M. Gasc, J. Guittard : **Geostatistical characterization of a fracture network in rock mass: two cases in Pyrenees (France)**. IAMG, 3-8 septembre 2006, Liège
- [Ac11] P. Alfonsi, M. Gasc-Barbier, D. Virely : **Modélisation numérique de la rupture d'une fondation sur versant rocheux : influence du modèle et des paramètres utiles pour la fracturation**. ELU / ELS, 23-25 août 2006, Paris *pp 173-182*
- [Ac10] M. Gasc-Barbier, D. Virely, J. Guittard : **Caractérisation expérimentale et in-situ de la matrice et des discontinuités rocheuses : cas du tunnel de St Béat**. *JNGG 27-29 juin. 2006 Lyon, France pp. III-201- 208*
- [Ac9] M. Gasc-Barbier, D. Virely, J. Guittard, V. Merrien-Soukatchoff : **Different approaches to study the fracturation of a marble rock – interest in St Beat tunnel (French Pyrenees)**. EUROCK 2006. Liège (Belgique) 9 –12 mai 2006 *pp 619-623*
- [Ac8] J. Guittard, S. Souvignet, M. Gasc-Barbier, D. Virely : **Field investigations realized for St Beat tunnel (France –31)**. *Géoline 2005. 23-25 mai 2005. Lyon. 6 pages CD-Rom*

- [Ac7] M. Gasc-Barbier, S. Chanchole, B. Lecampion, P. Bérest: **Study of the creep behaviour of Bure clayey rock**. *Clays in natural and engineering barriers for radioactive waste confinement*. Rencontres internationales ANDRA. Reims 9 – 12 décembre 2002. Poster
- [Ac6] M. Gasc-Barbier, D. Tessier, M. Ghoreychi : **Evaluation of structural modifications of a hard deep clayey rock due to wetting / drying cycles**. International workshop on Environmental Geomechanics. *Monte Verit*_ Suisse. 30 juin - 5 Juillet 2002. pp. 335-340
- [Ac5] M. Gasc-Barbier, S. Chanchole, B. Lecampion, P. Bérest : **Study of the creep behaviour of a possible host clayey rock**. 6^{ème} KIWIR International workshop on Key Issues in Waste Isolation Research. ENPC Paris (France). 28 - 30 Novembre 2001. pp 189-198
- [Ac4] M. Gasc-Barbier, Ph. Cosenza, M. Ghoreychi, S. Chanchole : **Laboratory experiments for the swelling - shrinkage of deep clay under triaxial stress**. EUROCK 2000, 27-31 Mars 2000, Aix la Chapelle pp 705-710
- [Ac3] M. Gasc-Barbier, D. Tessier, M. Ghoreychi : **Mechanical behaviour of clay materials: importance of texture**. Actes du 9^{ème} Congrès International de Mécanique des Roches. 25-28 Août, Paris. pp. 595-600. Présentation au Comité Français de Mécanique des Roches. 14 Octobre 1999
- [Ac2] I. Djéran-Maigre, M. Barbier, D. Grunberger : **Experimental compaction of clays and associated hydromechanical modelling**. Biot Conference on Poromechanics 14-16 sept. 1998. Univ. de Louvain (Belgique). pp. 567-572
- [Ac1] I. Djéran-Maigre, M. Barbier, A. Pouya, V. Lamoureux Var, D. Grunberger : **Étude couplée de l'évolution de la microstructure et des propriétés macroscopiques des argiles compactées expérimentalement**. Symposium international sur la Géologie de l'ingénieur et l'environnement, 23-27 juin 1997 Athènes. pp 1787-1792

2.6. Communications sans publication

- [Com9] J. Wassermann, M. Gasc, G. Senfaute : **Damage localization during uniaxial compressions of anisotropic rocks**. Geophysical Research Abstracts, vol 11, *EGU (European Geoscience Union) 2009*. Poster
- [Com8] M. Gasc : **Comment dimensionner de larges talus routiers dans des roches fracturées ?** 22^{ème} Réunion des Sciences de la Terre. 21-24 avril 2008. Nancy. Poster
- [Com7] M. Gasc : **Le tassomètre à trois tubulures**. Journées de géotechnique du Réseau des LPC. 17-19 octobre 2006, Beynat France.
- [Com6] A. Marache, J. Riss, B. Rousseau, D. Virely et M. Gasc : **Caractérisation géostatistique du réseau de fracture d'un massif rocheux : le cas du Pallat (Pyrénées-Orientales)**. Journées de géostatistiques. 15-16 Septembre 2005. Fontainebleau France.
- [Com5] M. Gasc, Ph. Cosenza, M. Ghoreychi, S. Chanchole : **Expériences de laboratoire pour l'étude du gonflement des argilites sous conditions saturées ou non saturées**. Journée sur les argiles. École des Mines de Paris. Mai 2000.
- [Com4] I. Djéran-Maigre, M. Gasc : **Étude des bassins sédimentaires par mesures expérimentales et modélisation de la compaction**. 18^{ème} Réunion des Sciences de la Terre. 17-20 avril 2000. Paris.
- [Com3] M. Gasc, Ph. Cosenza, M. Ghoreychi, S. Chanchole, D. Tessier : **Mise en évidence expérimentale du gonflement / retrait dans les argiles raides profondes**. 18^e réunion des sciences de la terre. 17-20 avril 2000. Paris.
- [Com2] M. Gasc-Barbier, Ph. Cosenza, M. Ghoreychi, S. Chanchole, D. Tessier : **Expériences de laboratoire pour l'étude du gonflement des argilites sous conditions**

saturées ou non. Journées Scientifiques de l'Andra : 7-9 dec. 1999. Palais des congrès de Nancy. *Poster.*

[Com1] M. Gasc-Barbier, Ph. Cosenza, M. Ghoreychi, S. Chanchole : **Laboratory experiments for the swelling - shrinkage of deep clay under saturated and unsaturated conditions.** ALERT Meeting, 25-27 Octobre 1999, Aussois.

2.7. Liste des rapports

Rapports d'étude ou de recherche (publics)

2010 : STABROCK Impact des changements climatiques sur la stabilité des fronts rocheux : Observation, Expérimentation et Modélisation Rapport Final Mars 2010. DSR-10-98113-02244A. auteurs : Frank C., Dünner C., Laouafa F., Senfaute G., Merrien-Soukatchoff V., Clément C., Gunzburger Y., Guglielmi Y., Lançon H., Mudry J., Darve F., Donzé F., Duriez J., Pouya A., Gasc M., Wassermann J.

2009 : Opération 11M093 « mouvements de terrain » - Mouvements rocheux - Pratiques des LR. Rapport n°16-75-10-2009/16-010/01. *Décembre 2009*

2009 : Opération 11M072 « Ouvrages en sites sismiques » - Étude de l'impact des cycles de gel/dégel sur les vitesses de propagation des ondes P et S dans les roches. Rapport n°16-75-010-2008 / 16-010 / 02. *Janvier 2009*

2009 : Opération 11P061 « Rhéologie des sols et des roches » - Étude du comportement mécanique de 3 matériaux rocheux : gneiss, poudingue et marbre. Dossier n°16-75- 011-2008/16-011/01. *Janvier 2009*

2008 : Opération 11M072 « Ouvrages en sites sismiques » - Rapport d'étape – synthèse bibliographique des ondes dans le sol. Rapport n°16-75-010-2008/16-010/01. *décembre 2008*

2008 : Projet Stabrock : bilan du travail réalisé 2005-2008. dossier n°16-60-014-2008/ 16-14/02

2008 : Opération 11M052 « Risques Rocheux » - Rapport de synthèse des 4 ans. Dossier n° 16-75- 007-2008 / 16-07 / 02. *Septembre 2008*

2008 : Opération 11M052 « Risques Rocheux » - Rapport d'étape. Partie B – mécanismes de déformation. Dossier n°16-75- 009-2007 / 16-009 / 02. *février 2008*

2008 : Opération 11M052 « Risques Rocheux » - Rapport d'étape. Partie A – caractérisation du massif. Dossier n°16-75- 009-2007 / 16-009 / 01. *janvier 2008*

2008 : Opération 11P061 « Rhéologie des sols et des roches » - Essais et interprétation. Dossier n°16-75-012-2007/12-2007/02 *Janvier 2008*

2007 : Rapport d'étape Stabrock – essais de laboratoire, fin de la 1ère tranche. Dossier n° 16-31-026-2006/16-026/03

2007 : Opération 11P061 « Rhéologie des sols et des roches » - Rapport bibliographique. Dossier n°16-75- 012-2007/12-2007/01 *Août 2007*

2007 : Opération 11M072 « Ouvrages en sites sismiques » - Rapport d'avancement. Dossier n° 6-75- 011-2007 / 16-011 / 01. *Mai 2007*

2006 : Opération 11P061 « Rhéologie des sols et des roches » - Rapport d'étape. Dossier n°16-75- 010-2006 / 16-010 / 01. *décembre 2006*

2006 : Opération 11M052 « Risques Rocheux » - Rapport d'étape. Partie A – caractérisation du massif. Dossier n°16-75- 009-2006 / 16-009 / 01. *décembre 2006*

2006 : Analyse des biais induits – Synthèse méthodologique. Dossier n°16-69-017-2005 /16-018/3, sous convention d'étude CETU/Cnam. *septembre 2006*

2006 : Opération 11M052 « Risques Rocheux » - Rapport d'étape. Partie B – mécanismes de déformation. Dossier n°16-75-009-2006 / 16-009 / 01. *septembre 2006*

2006 : Opération 11MEP2 « ouvrages en sites sismiques » - rapport relatif à la rédaction du cahier des charges. Dossier n°16-75-007-2006/16-007/1 *mars 2006*

2006 : Opération 11E052 « Risques Rocheux » - Rapport d'étape. Dossier n°16-75-019-2004/16-019/1. *3 janvier 2006.*

2005 : Opération de recherche 1BEP31 : Durabilité des sols traités à la chaux – rapport de fin d'opération. Dossier n° 16-75-03-2001/16-03/01. 31p + annexes.

2005 : Opération 11J022 - Modélisation numérique et physique du comportement des sols et des roches – fin d'opération. Dossier n°16-75-20-2004/16-020/01. 30 avril 2005. 19p.

2004 : Opération 11E052 « Risques Rocheux » - Synthèse bibliographique. 23 décembre 2004. Dossier n°16-75-019-2004/16-019/1. 58p.

2004 : Techniques de mesures - Validation de modèles de calcul d'ouvrages renforcés. 24 novembre 2004. Dossier n°2 25 660. 33p.

2003 : le tassomètre à 3 tubulures : Fiche recherche 1AEP11 : Techniques de mesure - Fiche prototype FOP600-237 – N°21J03171. 27 octobre 2003. Dossier n° 16-75-04-2001/16-04/2. 30p + annexes.

Rapports d'étude ou de recherche (non publics)

2009 : Rode Est de Narbonne. Aide à la rédaction du CCTP drains pour sols compressibles. Dossier n° 16.11.006.2009/16.006 / 02

2005 : Rode Est de Narbonne Fascicule 1 : Rapport / Fascicule 2 : Résultat des essais de laboratoire et in-situ. juillet 2005. Dossier N° N°16-11-024-2003/16-024/05. 45p + annexes.

Rapports de recherche et Notes de synthèse propriété de l'ANDRA :

2003 : D RP G3S 03-01 : Retrait- gonflement, pression de gonflement, altérabilité des argilites de l'Est. *Gasc M. Malinsky L.*

2002 : *D.RP.G3S. 02-004* : Elaboration d'un ou de plusieurs modèles de comportement différé des argilites de l'Est. *Collectif*

2000 : *NSY G3S 00-06* : bilan d'analyse phénoménologique de quelques situations de stockage en phase de pré-fermeture. Déchets B CE / DT *Gasc M.*

2000 : *NSY G3S 00-13* : bilan d'analyse phénoménologique de quelques situations de stockage en phase de pré-fermeture. Déchets B BB *Gasc M.*

2000 : *NSY G3S 00-14* : Synthèse de quelques études expérimentales et de modélisation des perturbations thermo-hydro-mécaniques. *Gasc M.*

2000 : *NSY G3S 00-15* : Bilan d'études expérimentales et de modélisation des perturbations thermo-hydro-mécaniques (Contribution au Rapport Scientifique de l'ANDRA). *Gasc M.*

2000 : *NSY G3S 00-16* : bilan d'analyse phénoménologique de quelques situations de stockage en phase de post-fermeture. Déchets B CE / DT et BB. *Gasc M.*

2000 : *NSY G3S 00-21* : Portée et amplitude de la perturbation mécanique et thermomécanique autour des ouvrages. Site Meuse / Haute Marne. *Gasc M.*

1999 : *B.RP.G3S. 99-003?* : Couplages hydro-mécaniques dans les argilites de l'est et les siltites du Gard. *Gasc M., Cosenza Ph.*

1999 : *B.RP.G3S. 99-001* : Calage des modèles à partir des résultats des essais thermo-hydro-mécaniques sur les argilites de l'Est et les siltites du Gard. *Gasc M.*

1998 : *B.RP.G3S. 98-007* : Comportement différé compte tenu des couplages thermo-hydro-mécaniques des argilites silto-carbonatées de l'Est. *Bauer C., Gasc M.*

Partie 2

Présentation des travaux de recherche

1. Introduction

Pendant les cinq années passées au G3S/LMS de l'Ecole Polytechnique en tant qu'ingénieur de recherche, dont trois dédiées à mon travail de thèse, je me suis intéressée au comportement des argilites de Meuse/Haute Marne et ai participé à différentes études pour le compte de l'Andra. Ces études étaient essentiellement expérimentales et m'ont permis d'aborder les couplages hygro-mécanique et chimico-mécanique dans ce type de formations rocheuses, ainsi que leur comportement différé. Ce travail a été réalisé dans le cadre global de la mécanique des milieux continus et a donné lieu à cinq articles ou chapitres [Ar2 à Ar6] et neuf communications avec ou sans publications dans des actes [Ac3 à Ac7, Com1 à Com3, Com5].

Mon intégration à l'ERA 01 du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse, a constitué un changement, puisque je me suis alors placée dans le cadre de la mécanique des milieux discontinus, pour aborder plus particulièrement le cas des massifs fracturés, et de l'importance de la bonne prise en compte de ces fractures pour la compréhension du comportement du massif. Le travail présenté ici se concentre sur les aspects développés depuis mon arrivée au LRPC de Toulouse. Nous présenterons d'abord les éléments nécessaires à la bonne description du massif rocheux, puis les analyses à réaliser en laboratoire pour connaître au mieux le comportement mécanique du massif, pour ensuite aborder la compréhension du comportement du massif du point de vue numérique et enfin, une réflexion sur la prise en compte et l'enregistrement de données *in-situ* sera réalisée.

La démarche présentée dans ce rapport est relativement différente de ce à quoi le lecteur pourrait s'attendre : en effet, en laboratoire régional, nous sommes confrontés à de multiples situations réelles de terrain. Ainsi, l'analyse d'une situation donnée, instabilité rocheuse avérée ou étude de tracé d'infrastructure délicate, conduit à élaborer un protocole expérimental qui permet l'acquisition en laboratoire et/ou sur le terrain des données utiles à la modélisation d'un phénomène et, par la même, à sa prise en compte dans une étude, un dimensionnement, une méthodologie, une normalisation... Mon travail s'appuie donc sur différents projets opérationnels et aide à nourrir ma réflexion. Cet aller-retour constant entre la pratique, l'expérience, la mesure et l'utilisation de modèles, puis la formalisation au travers de publications fonde mon travail de recherche.

2. Description du massif rocheux

Lorsque l'on souhaite rendre compte du comportement mécanique (ou hydraulique) d'un massif, il convient tout d'abord de le caractériser d'un point de vue géologique, minéralogique puis pétrographique puis de s'assurer de sa bonne description structurale. En effet, la géométrie des discontinuités du massif et plus particulièrement leur agencement dans l'espace déterminera les mécanismes d'instabilités potentielles à étudier plus particulièrement. Pour obtenir cette « bonne » description du massif rocheux, différentes actions ont été menées :

- Caractérisation du massif : un travail d'analyse comparée des méthodes usuellement utilisées pour la description du massif a été poursuivi afin d'appréhender les avantages et inconvénients de ces méthodes, à partir des données de l'étude avant-projet du tunnel de St Béat, en collaboration avec le CNAM et le CETU [Soum1], [Ac17] et initié grâce au travail de stage de Vincent Constant.
- Répartition géométrique des fractures : un travail d'analyse statistique sur la répartition dans l'espace a été réalisé conjointement avec l'université Bordeaux 1 (GHYMAC) initialement pendant le stage de Master 1 de Baptiste Rousseau, puis a été poursuivi [Com6], [Ac12].
- Représentativité des mesures : une réflexion est en cours sur ce sujet : en effet l'identification visuelle des discontinuités est, et ne peut être, que locale ; le travail de reconstruction 3D ne peut être bien réalisé que s'il prend en compte les objectifs particuliers de l'étude pour laquelle il est conduit et s'il se fait en lien avec les codes de calculs disponibles. En effet, dans le cas d'un talus rocheux, par exemple, si le talus est situé au-dessus d'une route, on s'intéressera particulièrement à ce qu'aucun bloc ne tombe sur la-dite route. La reconstruction 3D et la prise en compte des discontinuités devrait être déterministe et ainsi, conduire à un dimensionnement assurant la stabilité des blocs pris un à un (si certains ne peuvent être stabilisés, une purge sera sans doute alors nécessaire). Si le talus est en dessous de la route, et pour peu qu'il n'y ait pas d'enjeu à l'aval, on s'intéressera alors plus à la stabilité d'ensemble du talus, et donc de la route. Une approche statistique de la répartition des fractures conduisant à un dimensionnement pouvant laisser certains blocs non maintenus peut suffire à condition que la stabilité d'ensemble du support de la route soit maintenue. Cet aspect sera repris en 4.1.

Ces trois parties vont être reprises plus précisément ci-après. Néanmoins, il faut garder en mémoire que la description du massif est réalisée afin de permettre l'identification géométrique des grands ensembles structuraux. Elle a donc finalement deux buts principaux : d'une part permettre de faire un échantillonnage de roches représentatif des différents ensembles en vue de leur caractérisation en laboratoire (chapitre 3) et d'autre part d'obtenir le modèle géométrique du massif qui sera implémenté dans un code de calcul (chapitre 4.1).

2.1. Caractérisation du massif

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour la description d'un massif rocheux. Lorsque l'on s'intéresse en particulier à la reconnaissance des familles de discontinuités on est amené à travailler à deux échelles différentes : d'une part l'analyse des linéaments (échelle régionale) et d'autre part l'analyse des discontinuités à proprement parler (échelle locale). Les méthodes de reconnaissance utilisées doivent être en rapport avec l'échelle d'étude. Pour une analyse régionale des linéaments on utilisera essentiellement des photos satellites, photos aériennes, et les cartes orohydrographiques. L'ensemble de ces techniques ne donne finalement qu'une idée de l'orientation des principaux linéaments, et ne permet, ni d'avoir une idée quantitative précise de ceux-ci, ni d'avoir des informations sur le pendage des fractures identifiées. Ceci dit, cette étape est importante puisqu'elle permet d'identifier non seulement les grandes tendances mais aussi les zones à étudier plus précisément et les « marques » à rechercher dans l'analyse géologique locale. De plus, l'échelle de reconnaissance conduite à cette étape correspond approximativement à l'échelle des cartes géologiques disponibles (1/50 000^{ème}). Cette analyse permet donc de recouper les différentes informations disponibles sur un site.

Si on se place maintenant à l'échelle locale, celle de l'ouvrage, les discontinuités peuvent être mesurées directement :

- sur affleurement ;
- sur front de taille ;
- en galerie ;
- sur carottes issues de forage ;
- à partir d'imagerie de paroi (diagraphie) ;
- à partir de méthodes géophysiques.

Ces différentes techniques sont complémentaires et ne doivent pas être exclusives les unes des autres. Une analyse comparée des méthodes usuellement utilisées pour la description du massif a été menée à partir des données issues du site de St Béat (site décrit en annexe 1), afin d'appréhender les avantages et inconvénients de ces méthodes (informations obtenues en regard du coût) et de favoriser l'emploi de telle ou telle en fonction du contexte et des objectifs recherchés. L'étude a été menée d'un point de vue théorique (analyse bibliographique des différentes méthodes) et a ensuite été appliquée à un site d'étude particulier, afin de s'appuyer sur un cas réel. Le site du futur tunnel de St Béat (présentation en annexe) était particulièrement intéressant pour ce travail puisque y ont à la fois été effectués des levés sur affleurement, des levés systématiques en galerie, des sondages carottés avec diagraphies et mesures sur ces carottes.

2.1.1. Levé sur lignes de mesure

Le principe des lignes de mesure (*scanlines* en anglais), est de tracer une ligne la plus longue possible pour être représentative, en principe horizontale et à 1 m du sol (Figure 1), et de relever et décrire l'ensemble des discontinuités qui intersectent cette ligne, à l'exclusion de toute autre [Priest, 1993]. L'ensemble des caractéristiques notées dans les feuilles mises au point par le CETU (Centre d'Etude des Tunnels) pour le levé sur carotte [Chantron et Zumbo, 2002] doit potentiellement être levé. Ce point est détaillé ci-dessous car il constitue la base de notre travail : une analyse ne pouvant être correcte que si elle se base sur des données fiables et comparables :

- azimut et pendage : ils sont levés conformément aux prescriptions AFTES (pendage et azimut de pendage, qui correspondent aux coordonnées américaines « dip, dip direction »), c'est à dire que l'orientation est donnée par un angle compris entre 0 et 360° et le pendage par un angle compris entre 0 et 90° par rapport à l'horizontale, Figure 2 ; concrètement, les valeurs sont directement lues sur la boussole de géologue à condition de la placer à 90° par rapport à la fracture ;
- altération : il est demandé de fournir une note entre 1 (peu altéré) et 4 (très altéré) à la fois sur l'état de la matrice rocheuse, des discontinuités, puis globalement du massif dans son ensemble ;
- type de discontinuité : autant que l'analyse visuelle le permet, il s'agit de préciser si on a à faire à un contact lithologique, une stratification, de la schistosité, une diaclase, une faille ou bien un filon ;
- géométrie : cette caractéristique concerne à la fois l'espacement et la persistance (P sur la Figure 1) ; l'espacement est la distance (notée E sur la Figure 1) séparant deux fractures de la même famille, la persistance, ici est la longueur apparente de la fracture (notée P sur la Figure 1) ; ces deux grandeurs étant extrêmement délicates à mesurer sur le terrain, nous allons y revenir un peu plus bas ;
- description des épontes : cette information ne peut être complétée que si les deux lèvres du joint ne sont pas complètement jointives ou bien si on a pu réaliser une cassure fraîche ;
- ouverture : elle se mesure en millimètre et est estimée approximativement par rapport à des valeurs référence : 0,1 ; 1 et 5 mm ;
- remplissage : à nouveau il existe des propositions pour caractériser le remplissage : aucun, recimenté, sableux ou graveleux, silt ou sable argileux, argileux – compact, argileux mou ou glissant, broyé.

De même, nous allons détailler quelques aspects qu'il est fondamental de bien prendre en compte pour avoir des données fiables. Il est ainsi fondamental de relever la position des joints. Pour cela, on prend pour point 0 le début de la ligne et on relève **l'abscisse** (pour une ligne horizontale) à laquelle le joint recoupe la ligne. L'utilisation de cette mesure peut s'avérer délicate suivant ce que l'on souhaite en faire, et en fonction également de la planéité de l'endroit où est tracée la ligne. En effet, si l'affleurement sur lequel la ligne est réalisée est plan ou presque, il n'y a pas de problème, il suffit de se ramener à l'abscisse sur le « vrai » plan correspondant. Par contre, si l'affleurement est curviligne ou bien fait de lignes brisées, il est beaucoup plus difficile de se ramener à une abscisse mesurée sur un plan vrai. Dans le cas particulier d'une ligne courbe, l'abscisse mesurée est plus grande que celle du plan correspondant (sur la Figure 3, il est clair que l'abscisse mesurée en suivant le bord exact du talus rocheux est plus grande que l'abscisse reportée sur la droite représentée par la mire en position n). Or cette distance sert à la fois pour le repérage dans l'espace et pour la mesure de l'espacement. Cette distance peut donc se retrouver fortement faussée (biais estimé : la longueur mesurée = longueur vraie * $\cos \alpha$ avec α l'angle d'incurvation de la ligne par rapport au plan). Dans les cas où le front de relevé est peu découpé, il est relativement simple de prolonger la fracture jusqu'à la droite de référence (Figure 3), cela peut être réalisé par exemple à l'aide d'une planchette (support pour écrire). Lorsque le front est plus découpé, et que la prolongation de la ligne se révèle hasardeuse (angle <25° environ), il faut alors noter la distance perpendiculaire entre l'affleurement et la ligne théorique de projection (h sur la Figure 3). L'abscisse réelle est ensuite calculée au bureau. Le choix entre ces deux méthodes de levé dépend de la distance entre le front et la droite de projection ainsi que des moyens à disposition. En cas de doute, la méthode avec calcul au laboratoire est préconisée car, bien que plus longue, les résultats sont moins entachés d'erreur.

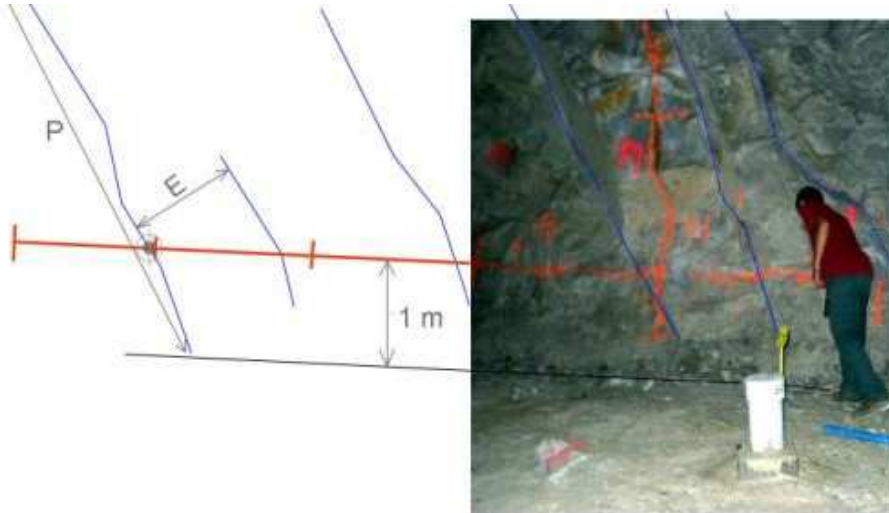


Figure 1 : Lignes de mesure réalisées à St Béat
photo montage r elis e par J. Guittard, LRPC Toulouse

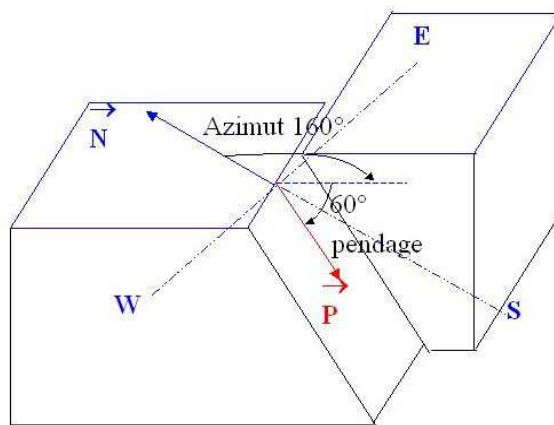


Figure 2 : Coordonnées Aft es, d'après [Aft es, 2003]

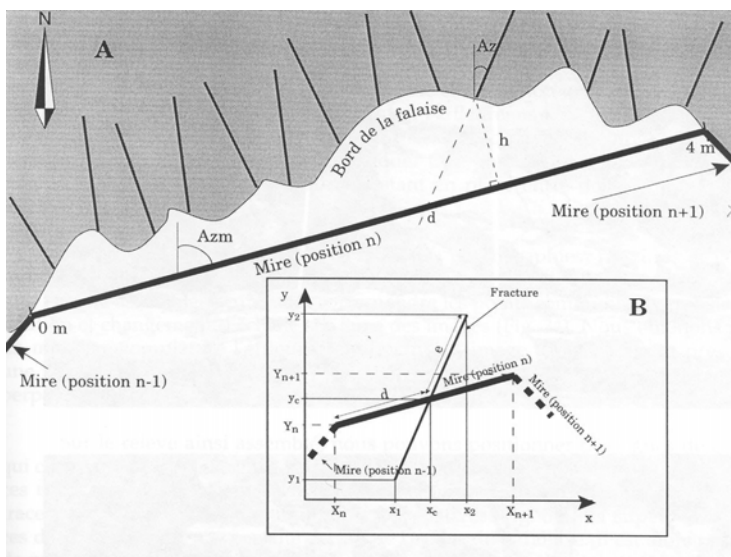


Figure 3 : Proc d e de levée de fracturation   l'aide d'une mire (Dezayes, 1996)

Ce schéma illustre la méthode des lignes de mesure en supposant que le trait de la mire correspond   la ligne de projection

A- procédée de mesure pour une mire disposée horizontalement. d : distance d'intersection au niveau de la mire, h : distance orthogonale   la mire, Az : azimut de la fracture, Azm : azimut de la mire

B- Représentation des fractures en plan le long des lignes de mesure. e : extension de la fracture

De plus, vis-à-vis de la mesure de **l'espacement** (E sur la Figure 1), une erreur peut apparaître : en effet, en plus de celle liée à la valeur de l'abscisse, une erreur peut apparaître, liée à l'interprétation directement lors du levé sur le terrain des fractures, dans le cas où ces fractures ne sont pas affectées à leur « vraie » famille. Le levé systématique doit permettre de relever sans distinction tous les joints rencontrés, puis, en toute rigueur, les espacements doivent être calculés de retour au bureau, et après avoir affecté chaque discontinuité à une famille identifiée par analyse stéréographique. Il reste alors à reprendre l'ensemble des joints identifiés comme faisant partie de la même famille et à recalculer les espacements réels entre les dits joints.

En ce qui concerne **la persistance** (P sur la Figure 1), à nouveau, il est important de signaler que sur le terrain, on ne mesure que des persistances apparentes. En effet, la trace visible correspond à l'intersection du joint avec l'affleurement : elle dépend donc fortement de la planéité de l'affleurement, mais cette dépendance n'est pas quantifiable.

NB : par rapport à la réalisation de lignes de mesures horizontales, des variantes existent, avec choix de fenêtres rectangulaires [Gervais et al, 1993] ou circulaires (toutes les fractures incluses ou recoupant la fenêtre sont levées), ou bien réalisation de lignes verticales. L'intérêt est alors de réaliser des mesures dans différentes directions afin de recouper le maximum d'orientations et donc de familles de fractures.

2.1.2. Levés sur carottes issues de forage

Pour pouvoir exploiter les données de carottes issues de forage, il faut pouvoir réorienter les fractures dans le repère global. Une difficulté importante réside dans le fait que dès qu'il y a une fracture complète de la carotte, il y a un risque que deux portions consécutives tournent l'une par rapport à l'autre. Dans le cas d'une fracture simple, les deux lèvres de fissures peuvent facilement se raccorder, mais dans des zones plus fracturées, ce n'est pas toujours le cas. Différentes techniques permettent de réorienter les carottes de manière directe :

- par **orientation directe** : la technique consiste à récupérer l'orientation de la section de carotte en fond de trou au moyen d'une prise d'empreinte en fond de forage (à la pâte à modeler ou avec des palpeurs). Cette technique donne de bons résultats pour des sols mous, mais peut poser problème en cas de fracturation intense pour reconstituer une seule carotte à partir des fragments [Louis, 1974] ;
- le **carottage intégral** consiste à sceller une barre dans un avant-trou en fond de forage à chaque passe, puis à carotter la roche ainsi armée. Ce procédé donne un taux de carottage de 100% et permet d'orienter les carottes ; néanmoins, cette technique est lourde et onéreuse [Fouché, 1999] ;
- le **carottage sous gaine**, qui consiste à faire descendre la gaine à l'avancement de façon à récupérer des carottes directement en place, grâce à un carottier à double tube, constitué de deux tubes emmanchés l'un dans l'autre : le tube extérieur porte la couronne et est entraîné en rotation par les tiges de forage et le tube intérieur recueille la carotte, en la protégeant de la destruction, car ne tournant pas [AFTES, 2004].

Lorsque les carottes n'ont pas été orientées en place, une orientation indirecte est possible dans certains cas, et en particulier si les terrains traversés sont porteurs de marqueurs lithologiques ou structuraux. Dans ce cas, et à condition qu'une imagerie de paroi correspondante ait été réalisée, l'orientation peut se faire par comparaison différée des levés directs sur carotte et des images de la paroi du forage par diagraphie optique (voir plus bas).

Différents marqueurs peuvent ainsi être utilisés : des vides visibles sur carottes et sur images optiques, des fractures parallèles ou en opposition de direction de plongement etc..

Dans tous les cas, il est nécessaire de tracer préalablement une génératrice, c'est à dire une droite de référence à partir de laquelle des mesures locales d'orientation et de pendage pourront être effectuées et qui devra être réorientée dans le repère global. Une fois cette génératrice tracée, plusieurs méthodes sont possibles pour échantillonner les discontinuités sur carottes de forages.

A la boussole et à l'inclinomètre [Dezayes, 1996]

Pour une roche raide, l'orientation des failles est réalisable à la boussole et à l'inclinomètre. Une technique simple consiste à placer le segment dans un seau de sable. En plaçant la carotte dans la même configuration que dans le forage (si on la connaît), on peut alors mesurer les discontinuités en s'affranchissant du calcul de rotation des données. Néanmoins, l'inclinaison du forage et la longueur souvent faible des segments de carotte compris entre deux discontinuités permettent rarement d'utiliser cette technique.

Au mètre à ruban et au pied à coulisse

C'est cette méthode qui a été retenue pour l'étude des carottes de St Béat (Présentation du site en annexe 1), nous allons donc l'explicitier : après avoir noté la profondeur moyenne de la discontinuité, on mesure au mètre à ruban la distance x du point le plus bas de l'ellipse par rapport à la génératrice. Le sens positif est le sens des aiguilles d'une montre. On retrouve alors l'azimut du vecteur de plus grande pente par l'égalité :

$$Az = x * \frac{180}{r \pi}$$

avec r le rayon de la section de la carotte.

On mesure ensuite la longueur d projetée sur l'axe du forage du grand axe de l'ellipse et enfin, on retrouve le pendage du vecteur de plus grande pente par l'égalité :

$$Pend = \tan^{-1} \left(2 \frac{r}{d} \right)$$

Cette méthode est celle qui risque d'engendrer le moins d'erreurs possibles puisqu'elle s'affranchit d'une mauvaise horizontalité du banc de mesure et de la difficulté de mesurer l'azimut d'un plan de discontinuité à la boussole sur carotte. On obtient d'ailleurs directement l'orientation de la discontinuité en convention AFTES (Azimut, pendage du vecteur de plus grande pente - Figure 2). Il est d'ailleurs possible de mesurer tout type de discontinuité (imbriquée ou non dans le segment de carotte).

L'utilisation de cette méthode pour l'étude des échantillons de St Béat a conduit à identifier plusieurs difficultés :

- dans le cas où la génératrice est replacée dans le repère global grâce à une comparaison avec une image de paroi, ce recalage ultérieur demande de faire confiance aux mesures réalisées en diagraphie, donc d'intégrer l'erreur afférente ;
- l'erreur de positionnement e de la génératrice entraîne une erreur de $E_{Az} = (e * 180) / (\pi r)$ sur la mesure de l'azimut de la discontinuité pour une carotte de rayon r (soit $13,4^\circ$ pour une erreur de 10mm et une carotte de 85 mm de diamètre) ;
- inhérente à la méthode choisie, l'observation en forage ne permet pas d'avoir de données sur l'étendue des fractures et leurs éventuels changements de direction et sur les familles dont l'orientation serait parallèle à l'axe du forage.

Le détail du calcul des erreurs et des biais engendrés par la méthode de réorientation des carottes choisie, ainsi qu'une illustration de la technique, est donné dans [Soum1].

2.1.3. Levés sur imagerie de paroi

Il existe différentes sortes de diagraphies, en fonction des propriétés de la roche que l'on cherche à connaître. Citons en particulier :

- gamma ray (mesure de la radioactivité des terrains traversés) ;
- trajectométrie (mesure de l'orientation du forage en X, Y, Z) ;
- *caliper* (diamètreur - mesure du diamètre du trou de forage) ;
- carottage sonique ou Full Wave (mesure de la vitesse des ondes de compression et de cisaillement dans le terrain encaissant) ;
- l'imagerie de paroi (permet le pointage des discontinuités).

Il existe plusieurs outils, acoustiques ou électriques qui permettent l'obtention d'une imagerie de paroi. La technique retenue pour avoir une imagerie de paroi utilisable doit dépendre des caractéristiques physiques du site. Le principe général de la réalisation d'imagerie est d'obtenir une image orientée de la paroi du sondage, sur laquelle les discontinuités ou plus généralement tout élément susceptible de jouer un rôle (zones de vides, de pertes d'eau ou de boue, etc.) peuvent être repérés. L'acquisition des données est donc réalisée directement sur 360°, et l'ensemble est calé par rapport au Nord magnétique et par rapport à la verticale grâce à une combinaison d'un magnétomètre à trois axes et de deux ou trois accéléromètres ou inclinomètres. L'acquisition se fait par tranches qui sont empilées pour constituer au final un log complet de toute la hauteur du forage [Laurent, 2005].

Les méthodes optiques

Pour les levés de fracture sur paroi, on utilise plutôt des diagraphies optiques. Dans ce cas, une caméra de type CCD (récepteur à transfert de charge)¹ filme un miroir en forme de cône qui permet la visualisation simultanée de toute la circonférence du forage. Un système d'éclairage constitué d'un ensemble de diodes électroluminescentes (LED) utilise un second miroir parallèle au premier pour illuminer principalement la zone observée. La méthode optique nécessite des conditions d'acquisition spécifique :

- trou sec ou rempli d'eau très claire ;
- n'importe quelle technique de forage ;
- pas de dépôt sur les parois ;
- bon centrage de l'outil ;
- roche tendre ou dure ;

¹ Le récepteur à transfert de charge ou CCD, pour l'anglais *charge coupled device*, assure la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique. Cette technique introduite en 1969 est en usage en astronomie depuis la fin des années 70, fournissant des détecteurs pour les domaines visible, infrarouge et proche UV. <http://media4.obspm.fr>

Les méthodes acoustiques (BHTV – BoreHole TeleViewer)

Le principe général de la mesure consiste en un émetteur-récepteur d'ondes ultrasoniques qui envoie un signal vers le bas. Ce dernier est dirigé vers la paroi par une surface concave (sorte de « miroir tournant ») incliné environ à 45° et qui tend à concentrer le faisceau. L'onde qui arrive à la paroi du sondage est réfléchiée et revient vers l'émetteur-récepteur via le « miroir ». Cette opération est réalisée plusieurs dizaines de fois par rotation complète du miroir, ce qui permet d'avoir une valeur tous les 2,5° et sur quelques millimètres de hauteur. Du point de vue condition d'acquisition, la méthode acoustique nécessite :

- un trou en eau ou en boue ;
- une paroi la plus lisse possible obtenue par une technique de forage appropriée ;
- une roche testée dure ;
- un très bon centrage de l'outil ;
- elle est par contre peu sensible à la présence d'un dépôt ou de « mud cake ».

Les données nécessaires au traitement sont l'amplitude du signal et le temps de transit dans le liquide, puisque le trou doit être en eau ou en boue pour une bonne acquisition de l'image.

Dans les deux cas (méthode acoustique ou optique), tout linéament traversant le forage en oblique va se présenter sous la forme d'une sinusoïde après le déroulement de l'image. Ces sinusoïdes sont alors pointées par ordinateur et présentées sous forme d'une liste de linéaments, de nature identifiée par l'opérateur (stratification, veines et filons, diaclases, etc..). Un extrait d'un log réalisé sur le forage SCH2 de St Béat est proposé Figure 4.

2.1.4. Travaux réalisés

Les différentes techniques développées ci-dessus (lignes de mesure, orientation dans le repère global des discontinuités mesurées sur les carottes de forage et imagerie optique) ont été appliquées aux données du site du tunnel de St Béat (description du site en annexe 1). Rappelons juste ici, que ce site est particulièrement intéressant, car une ancienne galerie d'exploitation de marbre, appelée « la galerie du château », s'enfonce en forme de Y dans le massif à 50 m au-dessus de l'axe du futur tunnel (plan de situation en annexe 1) et permet ainsi d'obtenir des informations au cœur du massif rocheux. Plusieurs sources d'information ont ainsi été croisées pour obtenir une cartographie des discontinuités la plus complète possible, à savoir :

- six cent discontinuités à partir des lignes de mesure réalisées aussi bien dans la galerie du château que sur les affleurements environnants ;
- mille quatre cents discontinuités à partir de l'imagerie de paroi sur les sondages SCH1 et SCH2 (300m de sondages carottés en tout, cf. plan de situation en annexe 1)
- deux cents discontinuités orientées sur les carottes issues de ces mêmes sondages entre les profondeurs 33,49 m et 110,00 m pour SCH1 et entre 63,34 m et 95,41 m pour le sondage SCH2.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention que j'ai mise au point avec le CETU, en partenariat avec la chaire de géologie du CNAM. Les résultats de ces travaux ont été publiés ou sont soumis : [Ac8] et [Ac9] comparent les familles de discontinuités retrouvées par lever systématique sur paroi, en diagraphie et par lever global « expert », [Ac8] étant plus centré sur les données terrain et [Ac9] sur les caractéristiques mécaniques obtenues

en laboratoire en vue d'une modélisation. [Ac17] et [Soum1] proposent une comparaison des discontinuités visibles par diagraphie et mesurées directement sur carottes de forage : [Ac17] reprend les principales conclusions énoncées ci-dessus et [Soum1] propose une analyse beaucoup plus poussée sur les biais et incertitudes de mesure. Nous reprendrons ci-dessous les principaux résultats.

Analyse des lignes de mesure

Près de 600 discontinuités ouvertes ont donc été relevées manuellement sur les lignes de mesures tracées à la fois dans la galerie du château et à flanc de colline (la Figure 1 présentait une ligne réalisée dans la galerie du château ; d'autres photos sont disponibles en annexe). Un travail préliminaire de regroupement de ces discontinuités a conduit à l'identification de cinq familles de caractéristiques différentes (orientation, pendage, espacement). Le détail peut être retrouvé dans [Ac8].

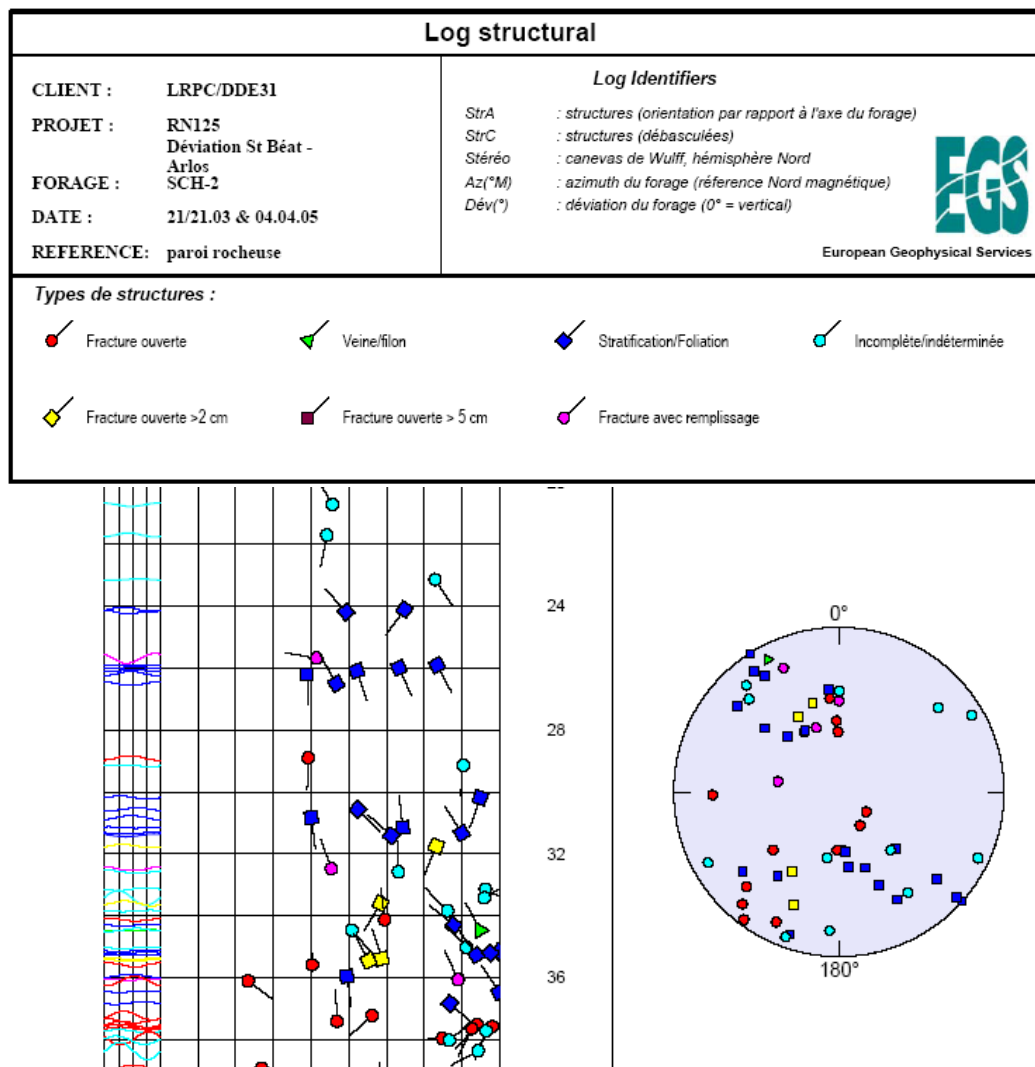


Figure 4 : Extrait d'un log résultant de l'imagerie optique –St Béat, forage SCH2

Analyse des diagraphies

Plus de 300 m de sondages carottés horizontaux ont été réalisés en deux attaques distinctes : la première, SCH1, à partir de la galerie du château, l'autre SCH2, à partir de la tête sud du tunnel. La société EGS (Luxembourg) a été mandatée pour effectuer les diagraphies (trajectométrie, caliper, radioactivité naturelle, ondes de compression et de cisaillement –full waves) ainsi que l'imagerie de paroi. Ce travail a conduit à l'identification de mille quatre cents discontinuités [Ac10] qui ont été classées en différentes familles : fractures (ouverte de moins de 2cm, ouverte de moins de 5cm, avec remplissage) stratification et foliation, veines et filons et enfin une catégorie dite incomplète ou indéterminée. Ces données ont alors été croisées avec celles obtenues sur les lignes de mesure et deux nouvelles familles ont ainsi pu être identifiées.

Analyse sur carottes

L'analyse des carottes de forage en terme de discontinuités a été menée en deux temps distincts : initialement, sur les carottes directement sorties du forage une analyse est menée pour effectuer un log géologique du forage et évaluer un RQD (Rock Quality Designation – indice très utilisé, qui permet de qualifier l'état de fracturation de carottes issues de forage [AFTES, 2003]). Cet aspect a été décrit dans [Ac9]. Ceci implique que l'ensemble des discontinuités ouvertes soit listé et mis en corrélation avec leur abscisse, par contre, leur orientation dans l'espace n'est pas prise en compte. Ultérieurement (2 ans plus tard), nous avons décidé d'orienter une partie des discontinuités rencontrées sur les carottes pour comparer cette mesure à ce que donnait l'imagerie de paroi. Ce travail a été réalisé durant le stage de V. Constant (ENSG) en 2006. Ce travail étant extrêmement fastidieux et la totalité des sondages n'étant pas réorientable, du fait de l'état des carottes, seuls quatre-vingt mètres du sondage SCH1 (entre 33,49 m et 110 m), soit cent seize discontinuités et trente deux mètres du sondage SCH2 (entre 63,34 m et 95,41 m), soit soixante-treize discontinuités, ont pu être réorientés. Sur ces longueurs, quelques zones de prélèvements pour essais ou des zones trop fracturées sont par ailleurs inexploitable.

Comparaison des données suivant l'analyse sur carottes et sur imagerie de paroi

Un travail important de comparaison des données a été réalisé. Il est présenté dans [Ac17] (centré sur les résultats par rapport à un creusement de tunnel) et dans [Soum1], plus axé sur l'identification des biais et incertitudes liés aux mesures.

Les conclusions de ces travaux permettent de pointer différents aspects :

- *Identification des discontinuités* : seuls deux tiers des discontinuités mesurées sur carottes (il s'agit donc de discontinuités ouvertes) ont été repérées par imagerie. Les discontinuités repérées uniquement sur imagerie sont majoritairement classées par l'opérateur en stratification/foliation. Parmi celles-ci, et après analyse visuelle des carottes, une bonne proportion fait réellement partie des foliations mais quelques-unes sont en fait des diaclases ou filons pour lesquelles l'opérateur des diagraphies n'a pas eu de critères suffisants pour les identifier comme tels. Ce changement d'affectation peut être problématique, car du point de vue mécanique la foliation ne se comporte pas comme les diaclase ou les filons.

- *Caractérisation des discontinuités* : deux familles supplémentaires ont été identifiées grâce aux carottes de forage. Elles correspondent à des discontinuités effectivement visibles sur diagraphie, mais dont la population était trop faible pour indiquer une réelle famille. Elles n'avaient donc pas été prises en compte.
- *Rôle mécanique des fractures* : Si l'on étudie plus particulièrement les discontinuités identifiées comme « stratification » pour une des familles identifiées, on s'aperçoit que très peu de joints de la stratification ont été relevés effectivement sur carotte (15) alors que 440 joints de stratification ont été pointés en diagraphie, ce qui signifie qu'à peine 3 % des membres de cette famille constituent des discontinuités au sens mécanique. Ce résultat est particulièrement important dans l'optique d'une modélisation mécanique du massif.
- *Classification des discontinuités* : cette même famille présente des caractéristiques tout à fait intéressantes : si l'on n'avait eu que les résultats de diagraphie, on aurait pu avoir tendance à l'assimiler directement à la stratification ; or, les levés sur carottes font apparaître une répartition relativement différente (la part due à la stratification est faible en pourcentage), mais cela est en partie dû au fait que la stratification n'a pas été relevée systématiquement sur les carottes ; il est, par contre, important de noter que pour cette famille, et pour la passe considérée, on a relevé quasiment le même nombre de diaclase en diagraphie et sur carottes (36 contre 32) ;

Une analyse du remplissage des discontinuités a alors été proposée, afin de comprendre pour quelles raisons certaines familles n'ont pas été repérées sur les images de paroi. On constate que les discontinuités sans remplissage ou avec peu de remplissage sont celles qui posent le plus de problèmes à distinguer. Les discontinuités dont l'ouverture est de moins de 0,2 mm sont rarement repérées par l'analyse sur images de paroi, et ce, quelle que soit la nature du remplissage. Les discontinuités dont le remplissage est argileux sont mieux repérées : le contraste entre le remplissage brun et la couleur grise de la roche en est la raison majeure.

Pour caractériser l'influence de ces observations sur le dimensionnement de l'ouvrage étudié (ici un tunnel), nous avons travaillé sur différents paramètres à savoir l'ID (indice d'intervalle entre discontinuités) et le RQD (Rock Quality Designation), décrits par exemple dans le manuel de mécanique des roches [CFMR, 2000]. Ces paramètres ont été systématiquement calculés de deux façons : classiquement à partir des discontinuités rencontrées sur les carottes de forage et également à partir de l'imagerie de paroi, en ne prenant pas en compte les discontinuités classées dans la catégorie « stratification » (car n'étant pas censées jouer un rôle mécanique). Différentes conclusions peuvent alors être tirées :

- **ID** : sur notre cas d'application et quel que soit le support utilisé, on reste dans la même classe d'ID, néanmoins, les écarts types sont différents (plus faible pour les relevés sur carottes que sur imagerie).
- **RQD** : il est intéressant de constater une diminution du RQD de quelques % entre celui mesuré sur carotte et celui évalué sur images de paroi (hors stratification). Cet écart semble être lié aux biais de détection des discontinuités (diaclases d'ouverture inférieure à 0,2mm environ et avec peu de remplissage).

Enfin, ce travail a conduit à proposer un tableau d'analyse des biais, en fonction des méthodes d'identification des discontinuités retenues (Tableau 3).

Tableau 3 : Synthèse et importance des biais répertoriés entre levés sur carottes et imageries de paroi

<i>Biais rencontrés</i>	<i>Sur carottes</i>	<i>Sur diagraphies</i>
Sur l'orientation des discontinuités	Important (lié à l'erreur de positionnement de la génératrice : $\pm 15^\circ$)	Minime (lié à l'incertitude de l'appareillage : $\pm 1^\circ$)
Sur la détection des discontinuités	Aucun si la trace de la discontinuité est complète. Moyen si la trace est partielle. Important si la densité de fracturation est élevée (zones en petits morceaux non exploitables).	Important si ouverture < 0,2mm avec peu ou pas de remplissage Moyen si ouverture > 0,2mm avec remplissage argileux (57% sur SCH2 et 68% sur SCH1 de discontinuités détectées)
Sur l'ouverture des diaclases	Important si la discontinuité est désimbriquée (donnée non accessible) Aucun si imbriquée	Minime (lié à l'incertitude de l'appareillage)
Sur le type de discontinuité	Minime (lié à l'appréciation du géologue)	Moyen à important (confusions possibles liées à la qualité de l'image et l'appréciation du géologue)
Sur les paramètres et critères des discontinuités	Minime (lié à l'appréciation du géologue)	Important (donnée non accessible excepté pour le remplissage)

Cette étude ayant été conduite en collaboration avec le CETU, ses principaux résultats ont été repris (fin 2008) pour donner aux donneurs d'ordres de bonnes prescriptions à mettre en place lors des chantiers futurs. Nous n'avons pas de retour à ce jour.

2.2. Répartition géométrique des fractures

Une réflexion sur l'apport de l'outil d'analyse statistique sur la répartition des fractures dans l'espace a été réalisée conjointement avec l'université Bordeaux 1. A partir des données terrains acquises sur lignes de mesure (orientation, pendage, espacement) il existe plusieurs méthodes permettant de remonter aux caractéristiques moyennes des familles. Précédemment, ce qui était réalisé au LRT, consistait à placer sur des stéréogrammes l'ensemble des données obtenues (éventuellement réparties en fonction de l'orientation des levés), de tirer les principales familles des nuages de points obtenus, puis de réaliser les moyennes arithmétiques des paramètres (orientation, pendage) de chaque famille. Le travail réalisé ici en lien étroit avec l'université de Bordeaux pendant le stage de Baptiste Rousseau (2005), consiste à utiliser les statistiques directionnelles [Mardia, 1972] pour remonter aux principales familles de fractures. Une analyse des variogrammes de densité linéique a été réalisée sur les données du site du Pallat [Com6] puis ré appliquée sur les données du site d'Ax-les-Thermes [Ac12].

Les principaux enseignements de ces travaux, et en particulier l'utilisation des variogrammes renseigne sur les grandeurs caractéristiques (longueur d'onde) des phénomènes étudiés. Dans la perspective de modélisation 3D du massif, on a alors une information sur la validité de l'extrapolation des données mesurées en surface vers le cœur du massif.

Il convient bien évidemment de poursuivre ces travaux pour toujours essayer de rendre mieux compte des caractéristiques des massifs rocheux étudiés. Ceci sera entrepris en particulier dans le cadre de la thèse de Stéphanie Mahé qui vient juste de débiter au 15 novembre et dont un des axes importants sera le suivi précis de la fracturation relevée à l'avancement lors du creusement du tunnel de Saint-Béat afin d'améliorer les modèles de prévision statistique des réseaux de fractures.

2.3. Représentativité des mesures

Lorsqu'on effectue des relevés sur le terrain, il est important de s'interroger sur la représentativité des mesures. Même si l'opérateur fait de son mieux, et tente d'être le plus objectif possible, l'identification des discontinuités est et ne peut être que locale, appliquée à la zone d'étude, en surface, ou au cœur du massif, mais selon un axe linéaire (forage), au mieux.

Or, même si il n'est pas formalisé, le travail de reconstruction 3D du massif doit ensuite être réalisé et se pose alors la question de l'extrapolation des résultats en dehors de la zone stricte du relevé. En particulier, une question fondamentale est : jusqu'à quelle profondeur une discontinuité visible en surface se poursuit-elle au cœur du massif ? De même il est important de s'interroger sur la finalité de la reconstruction 3D : suivant que l'on cherche à étudier sa stabilité ou les écoulements hydriques, on ne sera peut-être pas amené à faire les mêmes hypothèses sur l'évolution des fractures au cœur du massif. Du point de vue de leur rôle mécanique et dans l'optique de l'étude d'un massif pour assurer sa stabilité, il est important de prendre en compte les discontinuités jouant un réel rôle mécanique et de laisser de côté celles qui n'en n'ont pas (persistance trop faible, ou re cimentation importante) mais qui peuvent contribuer à alourdir inutilement le calcul.

Des réflexions en ce sens ont été menées (en collaboration avec V. Merrien-Soukatchoff [Ar7] et [Ac15]) mais pour être précises, ne peuvent se faire qu'en lien étroit avec les codes de calculs utilisés pour rendre compte de la géométrie du site. Cet aspect sera donc détaillé plus particulièrement dans la partie modélisation (voir 4.1).

2.4. Synthèse partielle

La description du massif rocheux est la première étape à mener vers la compréhension de son comportement. Elle nécessite de comprendre l'agencement dans l'espace des différentes familles des discontinuités présentes, ce travail ne pouvant être fait qu'en connaissant les apports et les limites des moyens d'étude à notre disposition.

Dans cette partie, je ne suis pas revenue sur la nécessaire connaissance de la minéralogie de la roche ni de l'histoire tectonique de la région considérée. Ces aspects sont extrêmement importants, bien entendu, mais sont traités, pour chaque site en collaboration avec un géologue, et ne font pas partie des pistes d'amélioration proposées pour mon travail.

Cette caractérisation du massif passe nécessairement par un travail d'acquisition de données de mesure sur le terrain puis un travail d'analyse de ces mesures au laboratoire afin de créer une distanciation nécessaire à la bonne utilisation de ces mesures. Cette « bonne » utilisation demande de trouver un équilibre entre le temps passé à l'acquisition et au traitement des mesures, aux moyens financiers disponibles et effectivement mis en œuvre, et au gain ou à la surabondance d'information par rapport à l'objectif recherché (durée de vie de l'ouvrage, coûts de réparation éventuelle, enjeux du site, risques par rapport à la population locale, etc...).

3. Caractérisation en laboratoire

La caractérisation du massif sur le terrain, doit permettre d'aboutir aux choix des études à réaliser en laboratoire. Le comportement des massifs rocheux dépend essentiellement des discontinuités présentes (forme, nature, dimensions, orientations, fréquences et caractéristiques). Cependant, les paramètres caractéristiques de la matrice (variations des caractéristiques mécaniques en fonction du niveau de contrainte, état limite) doivent également être pris en compte pour obtenir une caractérisation complète. Mon travail de thèse portait essentiellement sur l'identification de phénomènes grâce à la réalisation d'expérimentation adéquate. Depuis mon arrivée au LRPC de Toulouse et grâce aux moyens expérimentaux disponibles, j'ai également pu développer des travaux portant sur la caractérisation en laboratoire à la fois de la matrice rocheuse et des discontinuités.

3.1. Description des dispositifs expérimentaux

3.1.1. Bâti pour la mesure des ondes élastiques :

Avant tout essai mécanique, les vitesses des ondes élastiques sont systématiquement mesurées conformément à la norme NF P 94-411. Les enregistrements avant essais sont réalisés grâce à un dispositif spécifique constitué de :

- un générateur d'impulsions électriques : il crée le signal en générant des ondes supérieures à 250 volts en un temps maximal de montée de $0,2 \mu\text{s}$; il génère, à la demande, l'onde de compression P, et les deux ondes de cisaillement S1 et S2 perpendiculaires l'une à l'autre ;
- un émetteur et un récepteur d'ondes P et S, de fréquence de résonance de 25 kHz à 1 MHz montés sur un bâti uniaxial muni d'une pompe qui permet de maintenir l'échantillon en place mais qui ne permet pas de charger mécaniquement l'échantillon au delà de quelques kN ; des feuilles de plomb, fixées grâce à du miel sur l'émetteur et le capteur, optimisent le contact avec l'échantillon ;
- un capteur de force permettant de contrôler la force appliquée par la pompe sur l'éprouvette ; ceci est utile pour vérifier que la force appliquée lors de toutes les mesures est toujours proche de 15 kN ; on utilise cette valeur afin de garantir un bon contact et pour assurer la reproductibilité des mesures ;
- un oscilloscope, dont la résolution en temps est inférieure ou égale à 10 ns, donnant un aperçu du signal mesuré pendant un intervalle de temps déterminé à l'aide du potentiomètre ;
- un PC permettant de gérer tout le système, ainsi que d'enregistrer les signaux émis et reçus pour un traitement ultérieur.

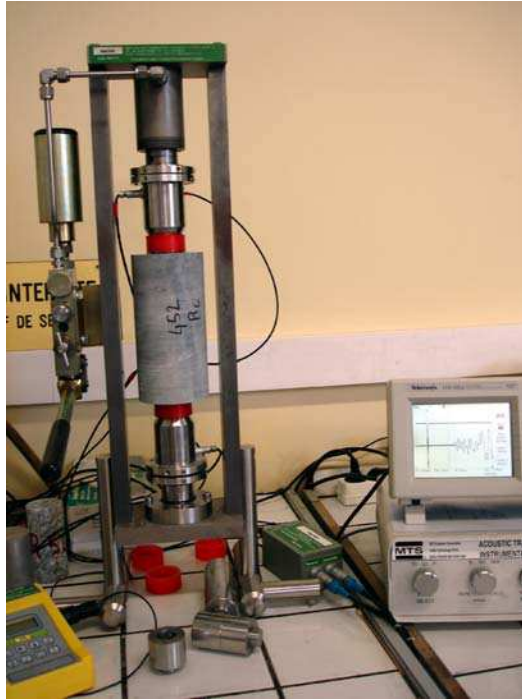


Figure 5 : Bâti utilisé pour la mesure des ondes élastiques

3.1.2. Presse pour les essais mécaniques

Les essais mécaniques sont réalisés grâce à une presse hydraulique de type MTS System, complètement asservie afin de maîtriser le pilotage des essais. Cette presse de rigidité 10^9 N/mm peut servir à la réalisation à la fois des essais de compression/traction et de cisaillement. Elle est équipée d'un vérin vertical de force maximale 1,1 MN et de course 100 mm et d'un vérin horizontal de force maximale 225 kN et de course 50 mm. La Figure 6a présente la presse dans sa configuration « essai uniaxial » et la Figure 6b dans sa configuration « essai de cisaillement ».

Une cellule triaxiale peut être adaptée à la presse. C'est une cellule haute pression (70 MPa), utilisable sous la presse avec un système hydraulique de confinement (contrôleur « pression / volume »). L'embase de cette cellule a été spécialement adaptée pour recevoir les récepteurs des ondes élastiques ce qui permet la mesure de la vitesse de propagation des ondes P et S, au travers de l'éprouvette au cours de l'essai.

Nous avons à notre disposition plusieurs moyens pour mesurer les déformations :

- collier extensométrique (Figure 7a), composé d'un extensomètre longitudinal (mâchoire) et d'un extensomètre transversal (chaînette), qui permet une mesure intégrée de la déformation radiale grâce à la chaînette ;
- jauges collées directement sur l'éprouvette, mais qui donnent alors des mesures locales des déformations.

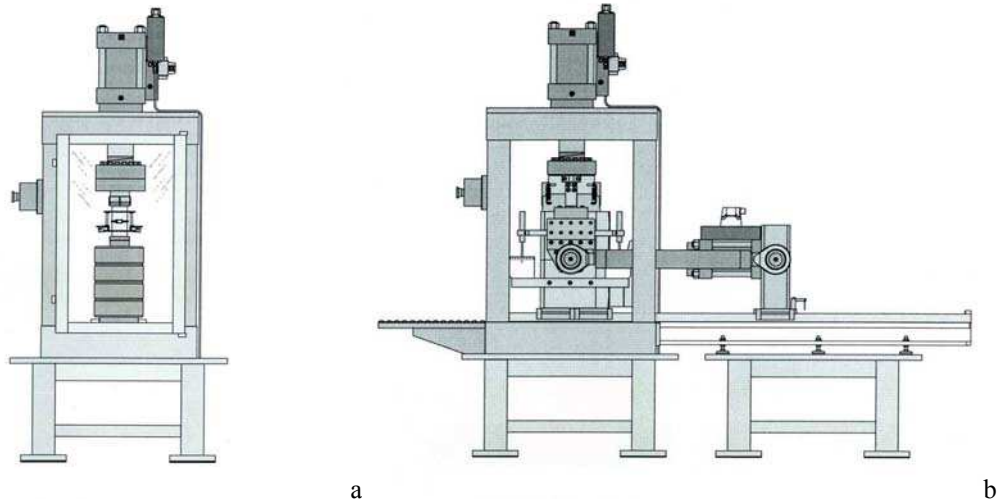


Figure 6 : Schéma de la presse en configuration a-uniaxiale et b-cisaillement

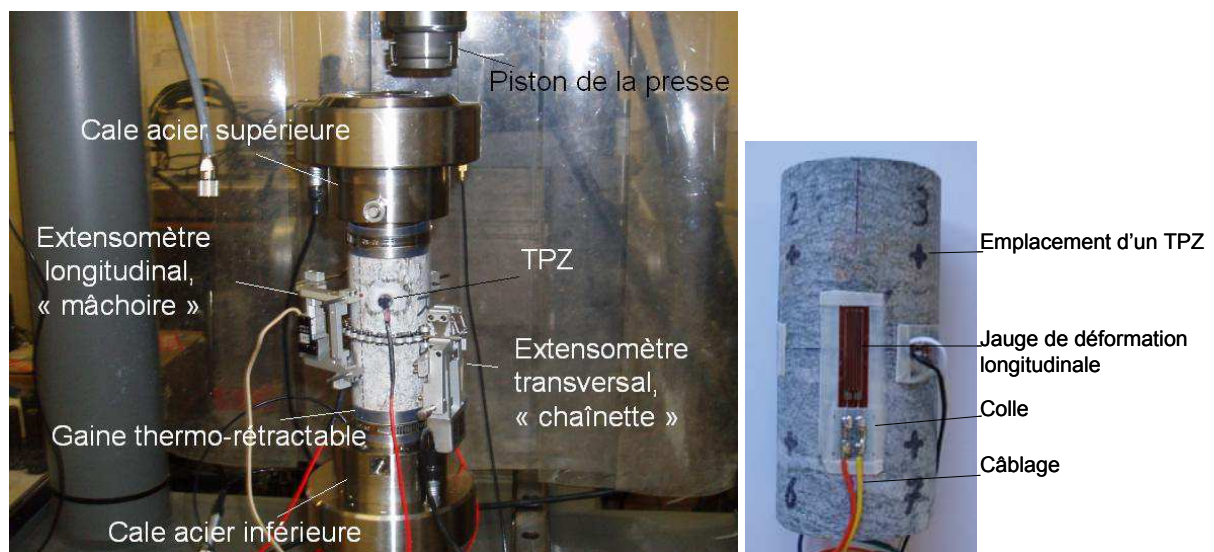


Figure 7 : Systèmes de mesure des déformations a-collier extensométrique b-jauge de déformation collée sur l'éprouvette

Le système extensométrique est composé d'un extensomètre longitudinal (mâchoire) et d'un extensomètre transversal (chaînette). Les TPZ sont les transducteurs piézoélectriques permettant l'enregistrement des signaux acoustiques

Le système d'enregistrement des ondes de volume intégré à l'embase de la cellule triaxiale est très proche de celui du « petit » bâti présenté plus haut. Il se décompose-en (Figure 8) :

- un générateur d'impulsions électriques supérieures à 250 Volts en un temps maximal de montée de $0.2\mu\text{s}$ (identique à celui du « petit bâti ») ;
- un émetteur et un récepteur d'ondes P et S, de fréquence de résonance de 25 KHz à 1 MHz intégré dans le dispositif de l'essai triaxial de la presse : le récepteur à trois capteurs, un capteur d'onde P et deux capteurs pour l'onde S, chaque capteur ne mesurant les déplacements que dans un sens ; l'onde S se déplaçant latéralement, pour mesurer tous ses mouvements, il faut mesurer les déplacements dans deux directions, séparées d'un angle de 90° ; cela implique de toujours garder le même angle entre l'émetteur et les capteurs lors des mesures (repères sur le dispositif de mesure) ;

- un dispositif de mesure de l'intervalle de temps entre le départ de l'impulsion générée et le signal reçu, permettant de visualiser le signal avec un oscilloscope, dont la résolution en temps est inférieure ou égale à 10 ns ;
- à nouveau, le produit de couplage entre l'émetteur, le récepteur et l'éprouvette (plomb et miel).

Pour la mesure des ondes de compression et de cisaillement lors de l'essai de compression uniaxiale, il est nécessaire d'utiliser la presse et par conséquent, il faut monter l'éprouvette en configuration triaxiale sans la cloche et la pression de confinement. Cette configuration est la seule qui permette de mesurer les ondes P et S. Cette mesure n'étant pas faite en continu, il est nécessaire d'effectuer un arrêt de l'essai sans déchargement lorsque l'on veut une mesure des ondes.

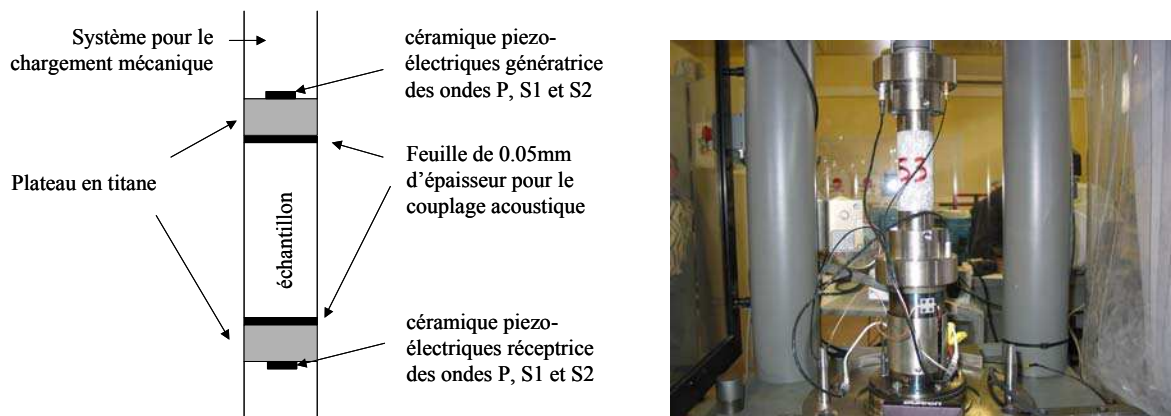


Figure 8 : Montage pour la mesure des ondes élastiques sous chargement mécanique

Enfin l'étude du cisaillement sur discontinuité rocheuse se fait par l'intermédiaire d'une boîte de cisaillement intégrée au système de chargement axial de la presse (boîte de 200 x 200 et de 150 mm de hauteur). Le système peut être entièrement piloté et permet d'analyser les propriétés géomécaniques des discontinuités, sous différents états de sollicitation (contrainte verticale constante / rigidité constante / etc...). Le système permettant les essais de cisaillement a été présenté en particulier dans [Ar9].

3.2. Caractérisation mécanique de la matrice

La caractérisation de la matrice rocheuse peut s'entendre à la fois par l'obtention de valeurs de paramètres à intégrer dans une loi de comportement mécanique et par la description de l'état de la matrice à l'aide de ses propriétés physiques (dont certains paramètres peuvent également dépendre) et de son évolution en fonction des sollicitations extérieures. La bonne caractérisation de ces propriétés, en laboratoire, est primordiale, car elle permet d'identifier les mécanismes prépondérants : en effet, les conditions de laboratoire sont parfaitement maîtrisées et les différents phénomènes pouvant intervenir peuvent être étudiés, si besoin est, indépendamment les uns des autres.

D'après le petit Larousse, l'endommagement est « l'action d'endommager ou son résultat ». Or endommager est « causer du dommage à ; abîmer ; détériorer ». En mécanique, la notion d'endommagement est plus précise et plus floue à la fois. En effet, elle diffère selon les auteurs, car on parle en général de seuil d'endommagement, qui correspond à une valeur

de la contrainte au-delà de laquelle le matériau est endommagé. Tout dépend alors de la définition même de l'endommagement. Il peut être défini par l'apparition de la microfissuration : on a alors à faire à une définition plutôt phénoménologique, mais la mise en évidence expérimentale peut-être relativement délicate. Si l'on considère une définition plus circonstancielle, par rapport au comportement mécanique macroscopique du matériau, c'est alors la valeur de la contrainte pour laquelle la relation contrainte/déformation n'est plus linéaire.

La Figure 9 présente une courbe contrainte-déformation classique ; on y distingue quatre phases dans le comportement mécanique [Jaeger et Cook 1979] :

- la phase de serrage où la concavité de la courbe contrainte-déformation est dirigée vers le haut (la compressibilité axiale diminue), correspondant microscopiquement à la fermeture de fissures préexistantes (OA sur la Figure 9) ;
- la phase pseudo-élastique où la courbe contrainte-déplacement est linéaire (AB sur la Figure 9) ;
- la phase non-linéaire pré-pic, manifestation macroscopique de la coalescence de fissures qui contribueront à former les futures fractures macroscopiques qui scinderont l'échantillon (BC sur la Figure 9) ;
- la phase post-pic, phase de propagation de la fracturation macroscopique.

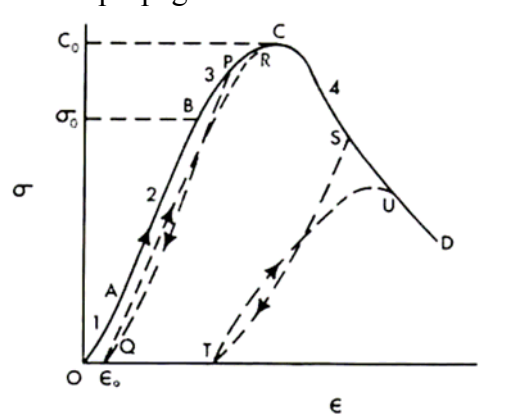


Figure 9 : Schéma de la courbe contrainte-déformation d'une roche soumise à une compression (Jaeger et Cook 1979).

La phase pseudo-élastique linéaire ne représente pas uniquement un comportement élastique ou réversible. Elle résulte de la superposition de processus réversibles et de processus irréversibles de déformation [Wassermann et al., 2009], un déchargement ne suivra pas nécessairement le même chemin et des déformations permanentes se manifesteront.

Ici, on ne s'intéresse pas au seuil d'initiation de l'endommagement, mais plutôt à son évolution. Ainsi, celle-ci pourra être caractérisée ou bien par des paramètres mécaniques globaux (évolution du module, diminution de la résistance à la compression simple, par exemple) ou bien par l'évolution de la micro-fissuration. Dans mon travail, deux méthodes ont été utilisées pour caractériser cette micro-fissuration : une méthode directe de mesure de la porosité connectée, par l'utilisation du porosimètre à mercure (pour les essais d'endommagement au cours du temps et de caractérisation des couplages chimico-mécaniques et hygro-mécaniques), et une méthode indirecte de la microfissuration par la mesure des vitesses des ondes élastiques. En effet, une diminution de la vitesse des ondes de compression (V_p) correspond, tous paramètres égaux par ailleurs, à une augmentation du volume de fissures au sein de l'échantillon. Cette méthode a été utilisée pour caractériser l'endommagement de la matrice rocheuse au cours d'essais uniaxiaux [Soum2], d'essais

triaxiaux [Ac16] et enfin par altération lors de cycles de gel/dégel [rapport n°16-75-010-2008/16-010/02] et stage de M. Escalier (2008).

3.2.1. Endommagement au cours d'essais mécaniques

Des essais uniaxiaux avec mesure des ondes élastiques (V_p / V_s) ont été réalisés sur les gneiss de Valabres (site présenté en annexe). Les résultats ont fait l'objet de différents rapports de recherche. Une partie de ce travail a été réalisée dans le cadre du projet ANR Stabrock (Impact des changements climatiques sur la stabilité des fronts rocheux : Observation, Expérimentation et Modélisation), dont je suis responsable pour le LRPC. Le rapport final a été envoyé au ministère à la mi-avril 2010 [Franck et al., 2010].

Le gneiss, roche métamorphique pluriminérale, est un matériau fortement anisotrope. Nous avons donc choisi de tester différentes orientations de l'axe du plan de carottage par rapport à la foliation naturelle de la roche pour caractériser de façon précise les conséquences de cette anisotropie sur le comportement mécanique (la Figure 10 présente les dix carottes préparées, avant essais). Les résultats importants caractérisant cette anisotropie mécanique sont donnés dans [souv2].



Figure 10 : Carottes de gneiss de Valabres

Caractérisation de l'anisotropie physique de la roche via les mesures de vitesses des ondes élastiques

Les valeurs initiales des ondes élastiques (P et S) ont été mesurées conformément à la norme NF P94-411. On note que les valeurs les plus élevées sont retrouvées pour les éprouvettes carottées parallèlement au plan de foliation (noté // dans la suite) alors que les valeurs les plus faibles sont obtenues sur les éprouvettes carottées perpendiculairement au plan de foliation (noté \perp dans la suite). Les valeurs obtenues pour des carottes non orientées se situent entre ces deux extrêmes (Tableau 4 et Figure 11). La différence est particulièrement nette pour les ondes de compression (ondes P).

Il est également important de noter les différences observables concernant les vitesses des ondes de cisaillement mesurées en fonction de l'orientation de l'axe de la carotte par rapport à la foliation :

- dans le cas des éprouvettes non orientées, on a quasiment superposition des valeurs des vitesses des ondes de cisaillement 1 et 2, alors que pour des éprouvettes orientées, on arrive bien à les différencier ;
- en fonction de l'orientation de la foliation par rapport à l'axe de la carotte on observe une différence dans le temps d'arrivée des vitesses de cisaillement 1 et 2 : dans le cas d'une éprouvette carottée perpendiculairement à la foliation, S2 est plus rapide que S1 (Figure 12), alors que dans le cas d'une éprouvette carottée parallèlement à la foliation S1 est plus rapide que S2. Cet effet pourrait être dû à la présence d'une linéation dans le plan de foliation qui conduirait donc à une anisotropie « secondaire » dans ce second plan. Il est difficile de trancher sur ces résultats car les systèmes expérimentaux généralement disponibles ne donnent qu'une valeur de vitesse des ondes de cisaillement (Fortin et al., 2005 ; Ghorbani et al., 2009) ; ces résultats sont donc innovants et mériteraient d'être vérifiés sur d'autres minéralogies.

Tableau 4 : Synthèse des essais réalisés sur les gneiss de Valabres

Éprouvette	Orientation / foliation	Type d'essai réalisé	Mesure des déformations	Vp	Vs1	Vs2	Résistance compression uniax. (MPa)
R295	Quelconque	Compression simple + Vp/Vs	globale	3177	1831	1826	56
R296	Quelconque	Compression simple + Vp/Vs	globale	3207	1822	1818	59
R667	Quelconque						80
R297	Parallèle	Acoustique (4 capteurs) + Vp/Vs	globale				35*
R633	Parallèle	Acoustique (8 capteurs)	jauges	4788	2803	2825	47
R634	Parallèle	Acoustique (8 capteurs)	jauges	4934	2797	3043	28
R635	Parallèle	Acoustique (8 capteurs)	jauges	4990	2343	2785	25
R636	Parallèle	Acoustique (4 capteurs) + Vp/Vs	globale	5021	3076	2844	84
R637	Perpend	Acoustique (8 capteurs)	jauges	2929	2397	2240	108
R638	Perpend	Acoustique (8 capteurs)	jauges	3040	2255	2270	89
R639	Perpend	<i>Non testée mécaniquement-</i>		3659	2586	2456	81
R640	Perpend	Acoustique (4 capteurs) + Vp/Vs	globale	3657	2486	2404	80

* la rupture a eut lieu pendant une phase de relaxation

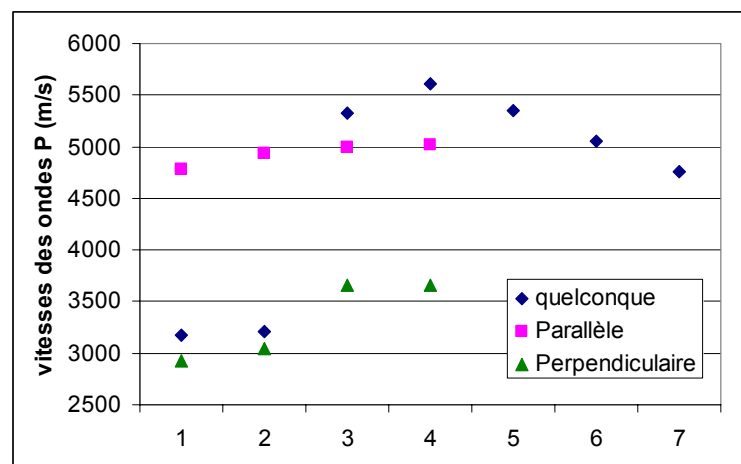


Figure 11 : Vitesses des ondes P en fonction de l'orientation de la foliation de la roche par rapport à l'axe de la carotte

La comparaison des temps d'arrivée en fonction de l'orientation de la carotte par rapport à la foliation illustre bien l'anisotropie physique de la roche. Cette anisotropie étant marquée, il semble nécessaire de la prendre en compte pour les modélisations ultérieures du massif.

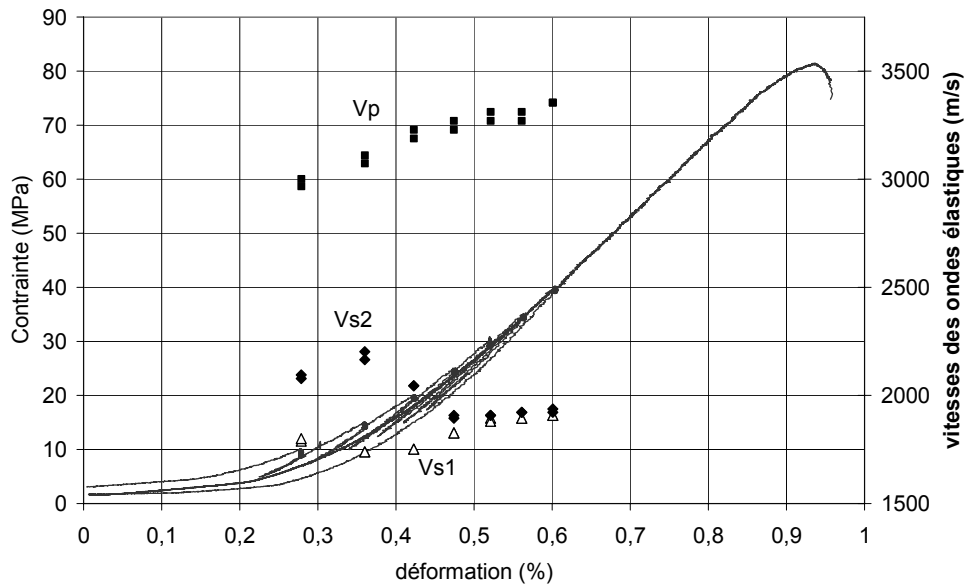


Figure 12 : Courbe contrainte/déformation caractéristique des essais uniaxiaux avec mesures des vitesses

L'éprouvette présentée (R640) est carottée perpendiculairement au plan de foliation

Évolution des modules statiques

Les modules d'Young statiques sont les modules estimés à partir des courbes « contrainte / déformation ». Les modules sont déterminés lors de la phase de déchargement. La Figure 13 regroupe ces estimations. Les figurés « pleins » concernent les éprouvettes // et les figurés « vides » les éprouvettes \perp . Il apparaît que les modules des échantillons // sont légèrement plus élevés que ceux des échantillons taillés perpendiculairement à la foliation, ce qui traduit bien un comportement plus raide et plus fragile, comme observé sur les valeurs de résistance à la compression simple (Tableau 4).

Conformément à ce qui était attendu, les modules obtenus en utilisant les déformations mesurées avec les jauges (mesures locales) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus avec les capteurs extensométriques (mesures globales), c'est à dire les éprouvettes R633, R634, R635 versus R297 et R636, pour les éprouvettes // et R637 et R638 versus R640, pour les éprouvettes \perp .

Au cours de l'essai, une augmentation du module avec la contrainte axiale est observée de manière systématique, ce qui témoigne d'un durcissement axial. Le coefficient de Poisson augmente également avec la contrainte. Ces variations indiquent un endommagement du matériau durant l'essai, endommagement relativement visible, quelle que soit l'éprouvette considérée (Figure 14).

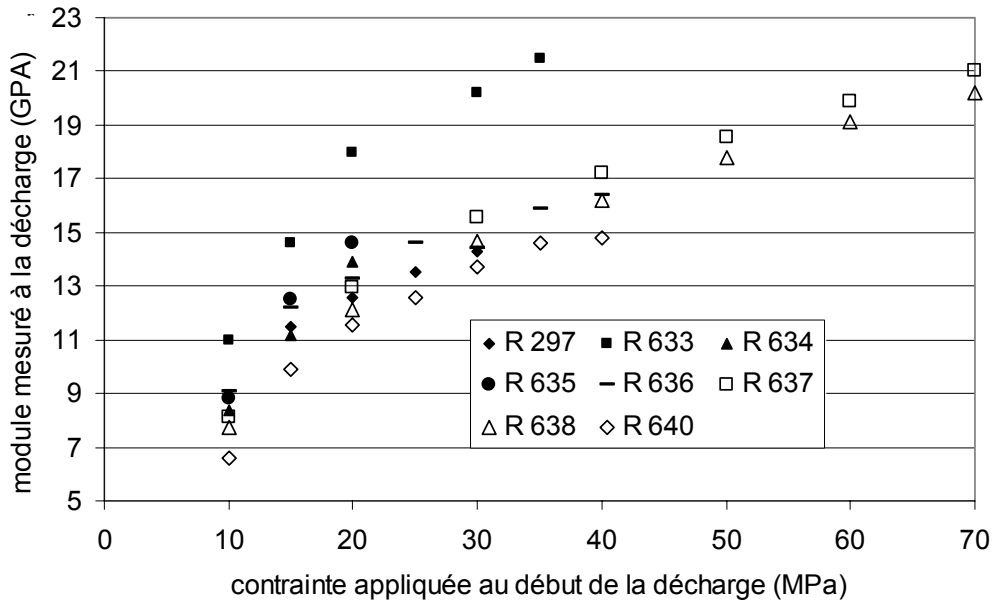


Figure 13 : Valeurs des modules statiques mesurés à la décharge en GPa

figuré « plein » les éprouvettes carottées parallèlement à la foliation et figuré « vide » les éprouvettes préparées perpendiculairement

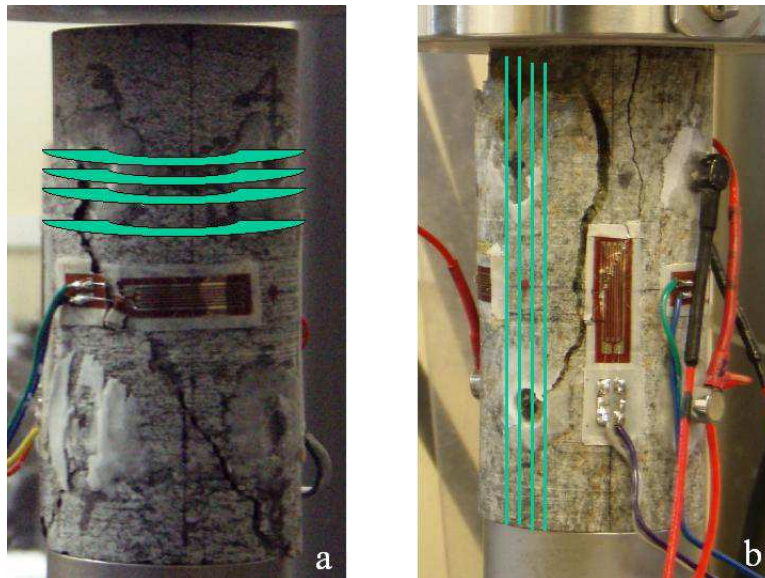


Figure 14 : Photos de 2 éprouvettes après essais a- R637 préparée perpendiculairement b- R633, carottée parallèlement à la foliation

Évolution des vitesses des ondes élastiques au cours du chargement

Des variations de vitesses des ondes élastiques sont observées avant la rupture, celles-ci restent cependant relativement faibles. Pour les éprouvettes *II*, cette variation est très faible, alors qu'elle semble plus marquée sur les éprouvettes \perp . En particulier sur l'éprouvette R640 (Figure 12) on peut noter une augmentation non négligeable de la vitesse des ondes P concomitante avec une diminution de la vitesse des ondes S (surtout S2). Cette éprouvette ayant été carottée perpendiculairement à la foliation, une compression simple provoque donc une fermeture des joints de foliation, induisant ces variations de vitesses d'onde P.

Évolution des modules dynamiques

Les modules dynamiques sont les modules calculés à partir des valeurs des vitesses des ondes élastiques, grâce à l'utilisation de la loi de Hooke [Jaeger et Cook, 1979] :

$$\nu = \frac{1/2 - (V_s/V_p)^2}{1 - (V_s/V_p)^2} \quad \text{et} \quad E = \rho \frac{V_p^2(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (3)$$

où ρ est la masse volumique.

Le module calculé par l'intermédiaire des vitesses des ondes élastiques sera noté E_{dyn} (module d'Young dynamique) et le module d'Young estimé à partir des courbes contrainte / déformation, ou module d'Young statique, sera noté E_{stat} .

Cependant, il est important de noter que ces expressions ont été établies dans le cas d'un milieu isotrope. Même si nous les utilisons ici, il ne faut pas perdre de vue que cette hypothèse n'est absolument pas satisfaite dans le cas du gneiss de Valabres. De plus, notre système de mesure permet de mesurer les vitesses des ondes S1 et S2, pour les calculs nous avons choisi de prendre la vitesse moyenne (moyenne arithmétique simple).

La Figure 15 présente les valeurs calculées pour l'ensemble des essais de compression uniaxiale réalisés sur les gneiss de Valabres, même si les courbes expérimentales ne sont pas toutes présentées ici. Les valeurs des modules dynamiques augmentent légèrement au cours des essais, de l'ordre de 10%, beaucoup moins que ce qui est observé pour les modules statiques, avec quasiment 100% d'augmentation, ce qui a également été observé dans le cas des argilites (Sarout, 2006). Il existe une très bonne concordance des valeurs mesurées avant la phase de décharge et pendant la recharge. De plus, comme pour les modules statiques, les modules dynamiques mesurés sur les éprouvettes *II* sont plus importants que ceux mesurés sur les éprouvettes \perp . Les variations des modules dynamiques semblent plus importantes dans le cas des échantillons T (figurés vides sur la Figure 15 – R640, l'augmentation du module atteint plus de 20 %) que ceux préparés parallèlement à la foliation (figurés pleins sur la Figure 15, l'augmentation est inférieure à 10%).

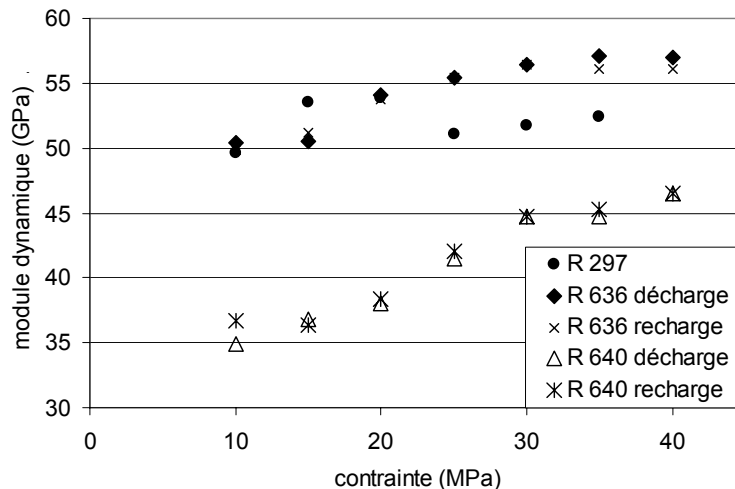


Figure 15 : Valeurs des modules dynamiques calculés, en GPa.

Les figurés pleins correspondent aux éprouvettes préparées parallèlement à la foliation, les figurés vides, aux éprouvettes préparées perpendiculairement à la foliation et les croix aux mesures effectuées à la recharge. A 25 et 30 MPa les valeurs à la décharge et à la recharge de l'essai R636 sont superposées

L'ensemble de ces travaux est présenté dans [Soum1] et les essais sont encore en cours d'exploitation. La réalisation de lames minces sur les éprouvettes après essais et imprégnées de résine est, par exemple, en cours de discussion en collaboration avec l'université de

Strasbourg. L'observation de lames minces devrait donner des renseignements plus précis sur la forme, la taille et l'agencement dans l'espace des cristaux du gneiss et l'imprégnation sur éprouvette après essai devrait permettre de suivre la localisation de la micro-fracturation par rapport aux cristaux. Ce travail devrait être réalisé très prochainement, et les conclusions intégrées à l'article en préparation pour *Geophysical Journal International*.

Évolution des modules sous chargement triaxial et isotrope

Les essais réalisés sur les gneiss de Valabres étaient des essais uniaxiaux. Des essais triaxiaux avec mesure des ondes élastiques ont également été réalisés, cette fois sur du marbre de St Béat dans le cadre de la thèse de Nhan Hoang. Ce marbre est quasiment exclusivement composée de minéraux de calcite. Compte tenu des contraintes attendues sur le site, nous avons testé des pressions de confinement allant de 5 à 30 MPa. La Figure 16 montre le résultat d'un des essais, tiré de [Ac16] et présente l'évolution des temps d'arrivée des ondes de compression (P) pendant un essai triaxial réalisé sous 5 MPa de confinement.

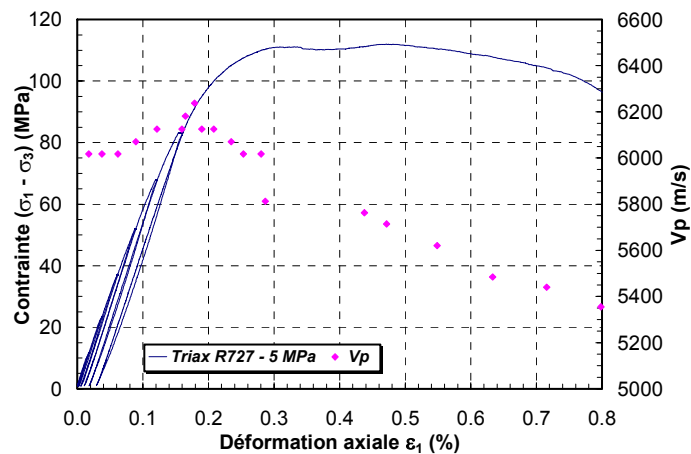


Figure 16. Évolution de la vitesse des ondes P sous 5 MPa de confinement

On observe dans la phase linéaire du chargement une augmentation de la vitesse des ondes de compression qui indique un serrage de la micro fissuration existante, plus une diminution de la vitesse interprétée comme la propagation instable de la microfissuration lorsque l'endommagement se propage.

Nous avons également regardé l'influence du confinement isotrope sur la réponse des ondes élastiques. La Figure 17 présente l'évolution des ondes P au cours d'un chargement hydrostatique allant jusqu'à 20 MPa. On y observe l'augmentation de la vitesse des ondes avec le chargement, ce qui indique bien la fermeture des micro-fissures pré-existantes.

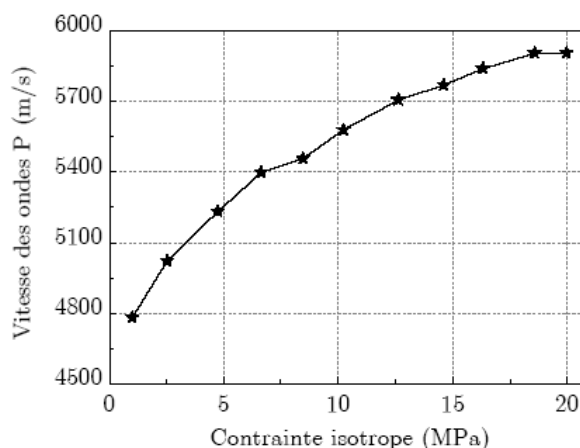


Figure 17. Évolution de la vitesse des ondes P au cours d'un chargement isotrope

3.2.2. Caractérisation de l'endommagement par méthodes acoustiques

Ce travail a été réalisé au LRPC de Toulouse à nouveau dans le cadre du projet ANR Stabrock et donc sur les gneiss de Valabres. J'en ai assuré la supervision scientifique, la réalisation et le traitement des données mécaniques. Le traitement des données acoustiques, en particulier du point de vue de la localisation des sources a été réalisé par Jérôme Wasserman, d'abord à l'IPG Paris et maintenant à l'IRSN. Huit éprouvettes ont été testées, cinq parallèlement à la foliation et trois perpendiculairement. Il a donné lieu à plusieurs rapports de recherche LRT (16-31-026-2006/16-026/03, 16-60-014-2008/16-014/02, 16-75-009-2007/16-009/02 et 16-60-014-2008/16-014/03) et à deux communications [Ac13] et [Com9]. Un article reprenant les principaux résultats, qui devrait être soumis à *Geophysical Journal International* est en cours de rédaction. Nous attendons l'illustration par les lames minces.

Activité acoustique

L'activité acoustique durant chaque essai est représentée par le nombre cumulé d'événements d'EA (événements acoustiques) identifiés (courbes rouges, Figure 18). Comme pour le comportement mécanique, le comportement acoustique diffère selon l'orientation de la foliation par rapport à l'axe de chargement. En effet, durant l'essai II (R633, à gauche), si l'activité acoustique est notable durant la phase de serrage (premier chargement, courbe bleue), elle est néanmoins faible durant la phase pseudo-élastique (deuxième et troisième chargements), elle augmente fortement durant les phases pré- et post-pic (dernier chargement et au-delà). Durant l'essai \perp (R637, à droite), l'activité acoustique est particulièrement élevée en début d'essai, elle devient faible à partir du cinquième chargement, elle augmente à nouveau fortement durant la phase pré-pic (dernier chargement).

Quel que soit l'essai considéré, les phases de relaxation et de déchargement sont asismiques (peu ou pas d'événements d'EA sont enregistrés), l'activité ne reprend qu'au cours du rechargement suivant ces deux phases (relaxation, déchargement), lorsque la contrainte atteint le maximum de la phase de chargement précédente. Ce comportement acoustique est bien connu sous le nom d'effet Kaiser (Kaiser 1950 ; Goodman 1963).

L'activité acoustique et le comportement mécanique apparaissent ainsi corrélés durant toutes les phases de l'essai.

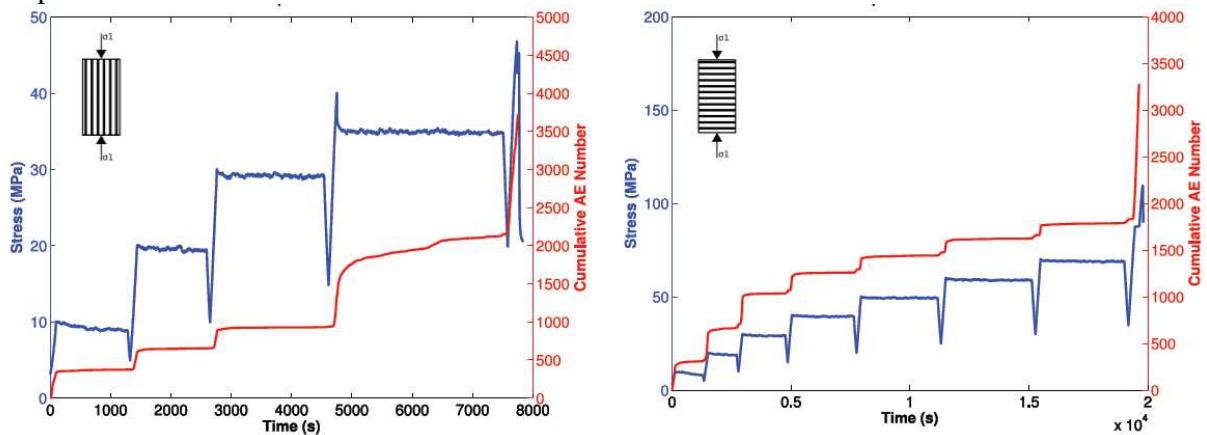


Figure 18 : Historiques de chargement (en bleu) et activités acoustiques (en rouge) durant les compressions uniaxiales de deux échantillons (R633, // à gauche et R637 \perp , à droite).

Localisation spatiale des sources d'EA

La distribution spatiale des hypocentres des événements d'EA enregistrés durant l'essai // et l'essai \perp (Figure 19) ne semble pas dessiner la géométrie de la fracturation macroscopique sub-verticale obtenue après essai (par exemple pour l'essai //, Figure 20). L'essaim d'hypocentres issu de l'essai // se distribue en deux structures sub-horizontales bien avant la rupture (Figure 19, à gauche). Lorsqu'on approche de la rupture, il est délicat voir impossible de localiser les événements à l'intérieur de l'échantillon. Concernant l'essai \perp , la distribution spatiale des hypocentres est plus diffuse, même si un essaim plus dense apparaît dans la partie haute de l'échantillon en fin d'essai (Figure 19, à droite).

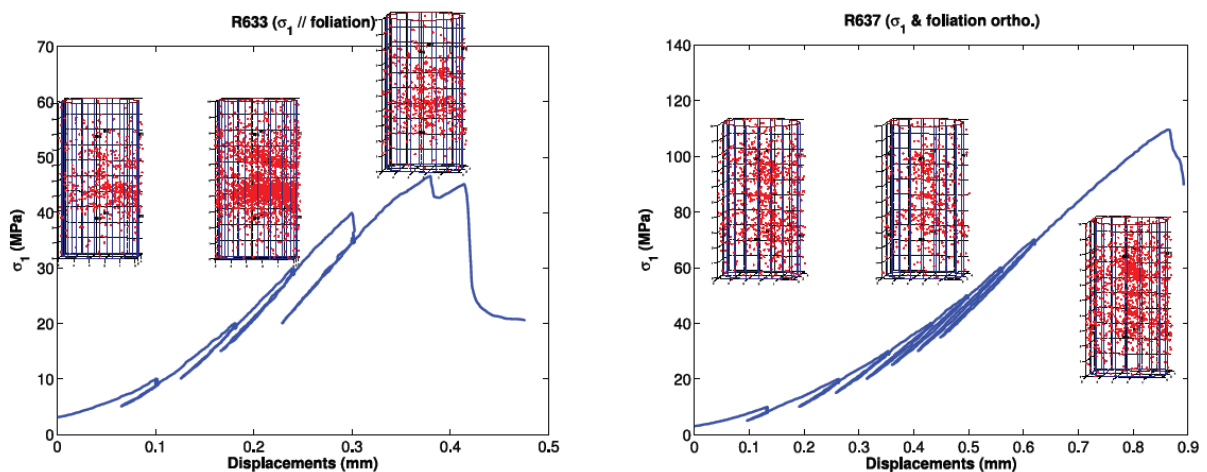


Figure 19. Courbes contrainte-déplacement (en bleu) et localisation des hypocentres des événements d'EA durant les compressions uniaxiales, R633 // à gauche et R637 T à droite

On observe l'orientation préférentielle des émissions acoustiques perpendiculairement au chargement, avec une activité acoustique relativement faible pendant la phase pseudo-élastique par opposition aux éprouvettes taillées perpendiculairement qui montrent une activité très importante pendant cette phase.

Le comportement acoustique diffère donc selon l'orientation de la foliation par rapport à la contrainte principale. Toutefois, dans les deux cas l'activité acoustique paraît bien corrélée

au comportement mécanique. L'effet Kaiser observé, l'asismicité des cycles de relaxation-déchargement-rechargement, leur réversibilité, témoignent d'une superposition de processus élastiques et de mécanismes inélastiques (endommagement) de déformation. On n'observe cependant pas de cohérence évidente entre la distribution spatiale des hypocentres des événements acoustiques – qui est une estimation de la localisation de l'endommagement – et les processus d'endommagement déduits des observations mécaniques. En effet, les hypocentres optimums de l'essai R633 à la foliation II se localisent en deux essais sub-horizontaux, ceux de l'essai R637 à la foliation \perp font partie d'un essaim plus diffus et ne semblent pas se distribuer spatialement selon des structures sub-horizontales (Figure 19, à droite). De plus, la distribution spatiale de l'endommagement obtenue via la localisation des hypocentres des événements d'EA ne semble pas dessiner les futurs plans macroscopiques de fracturation (Figure 20).

La localisation des hypocentres peut se faire grâce à l'utilisation d'un modèle de propagation des vitesses dans l'échantillon : puisqu'on connaît l'instant d'arrivée sur les capteurs, et à condition d'avoir suffisamment de capteurs (on préférera des système surdimensionnés, à plus d'équations que d'inconnues), il suffit de connaître la vitesse de propagation des ondes pour arriver à localiser précisément la source de l'émission acoustique. Ainsi la localisation est fortement tributaire du modèle de vitesse utilisé. Ici nous avons utilisé un modèle de vitesse isotrope, car le seul à notre disposition à ce moment là, or un modèle de vitesse isotrope transverse serait bien mieux adapté au milieu fortement anisotrope étudié ici. Des discussions sont actuellement en cours entre J. Wasserman et l'ENS pour pouvoir utiliser leur modèle isotrope transverse. Enfin, des observations indirectes de la fracturation macroscopique par scanner X (collaboration en cours avec l'IFP) devraient permettre de contraindre la localisation finale de l'endommagement. Enfin, des observations directes en lames minces permettraient d'estimer l'orientation des microfissures et de déterminer les micro-mécanismes de l'endommagement. Comme mentionné plus haut, un article reprenant ces principaux résultats est prévu pour début 2011. Ils sont également exposés dans le compte-rendu d'activité du projet Stabrock [Franck et al., 2010]).

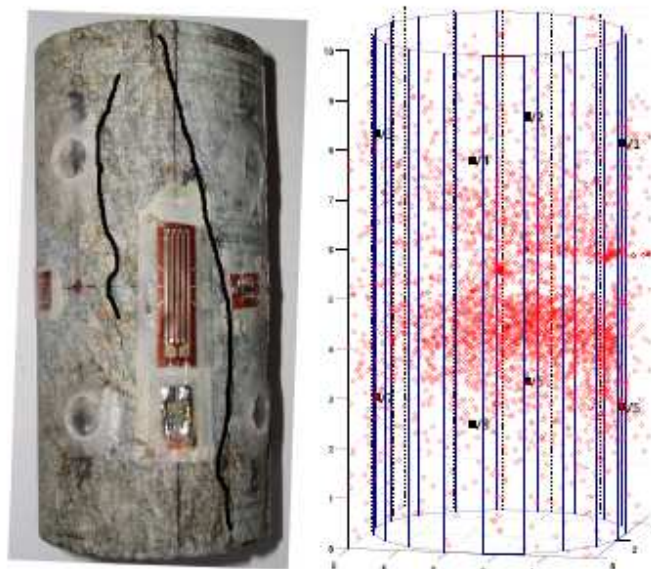


Figure 20 : Fracturation macroscopique sub-verticale post-rupture de l'échantillon R633 (foliation sub-parallèle à σ_1) et localisation des hypocentres

3.2.3. Endommagement au cours de cycles de gel/dégel

L'alternance de cycles de gel / dégel est susceptible de produire un endommagement diffus de la matrice rocheuse. Le but de cette recherche est de perfectionner notre connaissance de la caractérisation des roches par méthodes ultrasoniques. Pour ce faire, nous avons choisi de tester sept roches de natures pétrographiques différentes (gneiss, amphibolite, marbre, basalte, calcaire dolomitique, calcaire saccharoïde et grès). Les échantillons ont été prélevés essentiellement dans des carrières pour lesquelles le LRPC avait déjà travaillé, d'où une connaissance complémentaire des propriétés de chaque roche, et la possibilité, pour l'exploitant d'utiliser éventuellement nos résultats (en matière de résistance au gel). Cinq carottes de chaque pétrographie ont été réalisées, afin d'obtenir un réel échantillonnage, et de pouvoir appréhender la dispersion des résultats. Les résultats ont été exploités à la fois en terme de vitesses (temps d'arrivée des ondes), mais également en terme d'énergie et de fréquence caractéristique. Pour cela, un travail de traitement du signal par transformée de Fourier est nécessaire. Cette analyse vise à identifier d'autres paramètres, si possible, que les temps d'arrivée des ondes pour caractériser l'endommagement d'une roche. Ce travail est en développement à l'heure actuelle. Les premiers résultats ont été présentés dans des rapports internes (16-75-010-2008/16-10/02 et n°16-75-009-2007/16-009/02) mais n'ont pas été publiés pour l'instant.

L'énergie étudiée dans ce travail est l'énergie du signal enregistré. Son étude est intéressante puisque la sollicitation initiale étant toujours la même, la variation de l'énergie du signal réponse peut donner des renseignements sur les variations physiques subies par le matériau. L'énergie du signal est définie par : $E = \sum_i A_i^2 \Delta t$,

avec : E, l'énergie du signal échantillonné, A, l'amplitude du signal à chaque pas de temps, et Δt le pas d'échantillonnage. L'analyse de l'énergie des signaux de vitesse n'est pas répandue dans la littérature. Cette idée prolonge ce qui est réalisé (peu couramment toutefois) sur l'analyse des signaux d'émission acoustique (Wasserman, 2006). Il a ainsi été observé par Zang et al. (1998) que les événements les plus énergétiques se produisent au niveau du pic de contrainte lors de la compression uniaxiale d'un granite. Lors de la propagation de la fracture macroscopique et notamment en son front (Lockner et al, 1991), un accroissement brutal de l'énergie est également observé.

Nous présentons, ci-après, les premières conclusions obtenues grâce aux expériences sur des grès des Vosges. Les résultats obtenus sur les autres pétrographies sont présentés dans le rapport interne 16-75-009-2007/16-009/02. Les carottes de grès ont été soumises à 70 cycles de gel-dégel (atmosphère non contrôlée). Au fil des essais, ils sont devenus de plus en plus « friables » et leur masse a augmenté. Cette observation peut avoir une double explication : les échantillons testés avaient été gardés au préalable à l'air, sans précaution particulière. Leur état de saturation n'a pas été vérifié avant l'essai, mais il est très probable que l'on observe une resaturation progressive des échantillons. Un second effet peut néanmoins intervenir : la création de microfissures due à l'endommagement du matériau peut conduire à mettre en relation des pores initialement non-connectés, qui, à leur tour se remplissent d'eau et contribuent donc à la prise de poids. La Figure 21 présente l'évolution des vitesses de propagation des ondes élastiques.

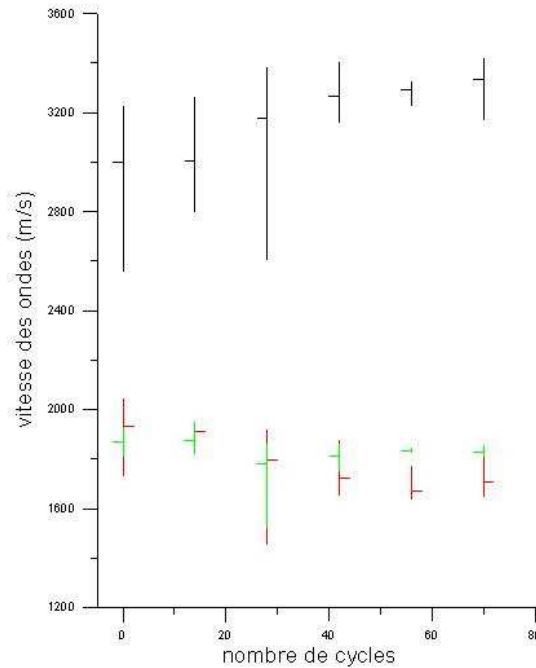


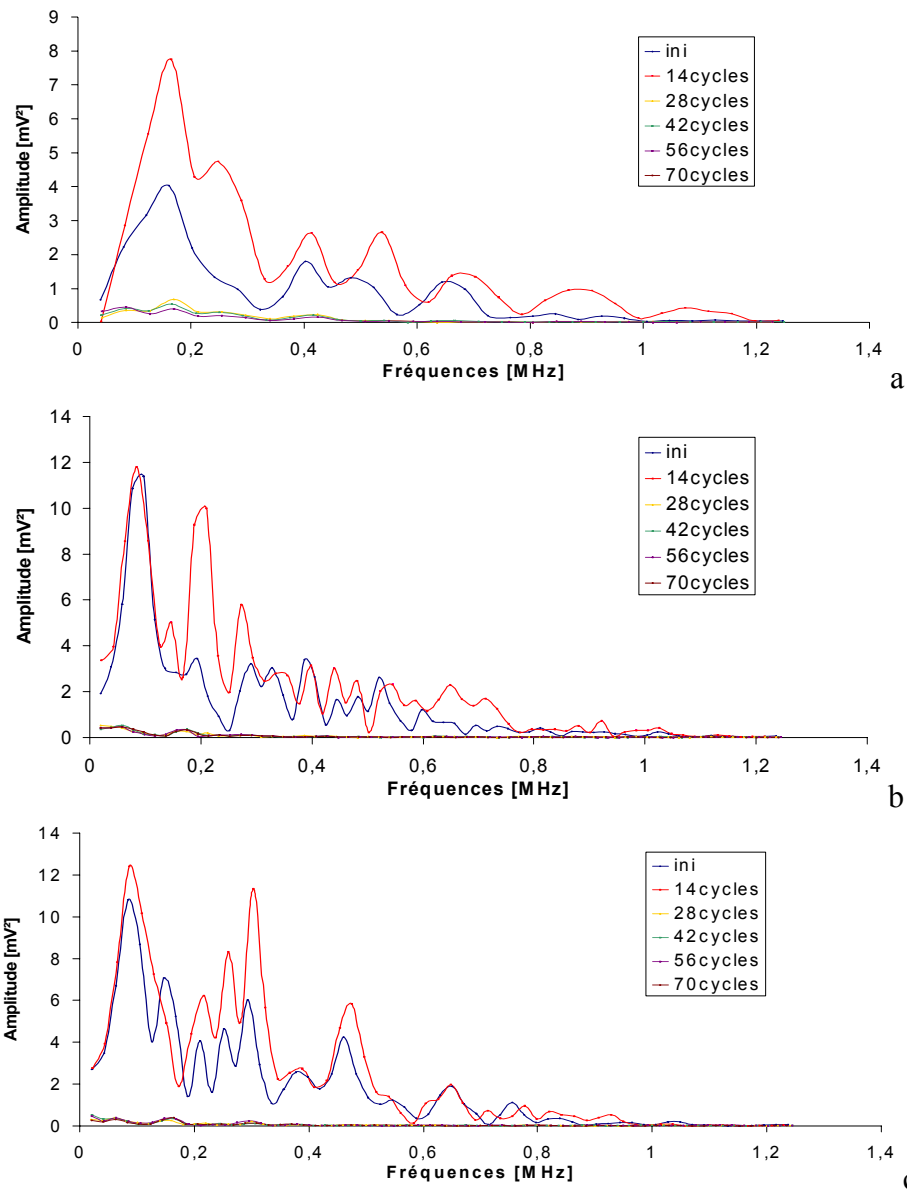
Figure 21 : Évolution des vitesses moyennes de propagation des ondes - grès

En noir, V_p ; en rouge V_{s1} , en vert, V_{s2} , la barre verticale présente la dispersion des mesures, la barre horizontale, la moyenne. L'augmentation de la vitesse des ondes P mise en parallèle avec la diminution de la vitesses des ondes S semble indiquer une resaturation de l'éprouvette au cours des cycles

On observe globalement une augmentation des ondes P et une diminution des ondes S. Cette augmentation des ondes P est sans doute due aux variations de la teneur en eau au cours de l'essai et, en particulier, à l'absorption d'eau des échantillons qui semble se produire : si l'eau remplit les vides des pores, la vitesse de l'onde P augmente car elle passe mieux dans l'eau que dans l'air. C'est, par contre, le contraire pour les ondes S. Les mesures sur les grès illustrent donc la propriété décrite dans [Gueguen et Palciauskas, 1992], « si on compare les vitesses en milieux sec et en milieux saturés, on observe en général $V_p(sec) < V_p(saturé)$ et $V_s(saturé) < V_s(sec)$ ». Cette interprétation est également rendue possible par le fait que, comme nous l'avons dit, la saturation des échantillons n'a pas été vérifiée initialement et que lors du dégel la cuve contenant les éprouvettes est remplie d'eau. Ainsi, les éprouvettes peuvent se saturer progressivement, si elles ne l'étaient pas à l'état initial, et si des fissures se créent, elles peuvent se remplir progressivement d'eau.

Il est prévu de compléter ce travail en calculant des porosités équivalentes pour, si possible, remonter au degré de saturation. Il est également prévu de refaire l'expérience en partant d'éprouvettes initialement saturées. La Figure 22 présente l'évolution du spectre des fréquences a- de l'onde P b- de l'onde S1 et c- de l'onde S2, pour la carotte R748. On y retrouve les fréquences caractéristiques :

- pour les ondes P, les pics sont relativement bien marqués à 0,16, 0,42, 0,54, 0,66 et 0,92 MHz ;
- pour les ondes S1, les pics semblent plus fluctuants : 0,09 MHz qui évolue vers 0,06 MHz, 0,2 MHz assez marqué et 0,49 et 0,64 MHz qui semblent évoluer vers 0,30 MHz ;
- pour les ondes S2, les pics sont très délicats à retrouver : on note cependant 0,086, 0,30 et 0,47 MHz qui semblent évoluer vers 0,065, 0,16 et 0,30 MHz.



**Figure 22 : Évolution des spectres de fréquence pour la carotte R 748 – grès des Vosges
a- Vp, b-Vs1, c- Vs2**

La Figure 23 reprend les énergies calculées. On observe une diminution nette de l'énergie au cours des cycles, qu'il faut peut-être mettre en lien avec l'évolution de l'absorption d'eau, puisqu'elle va dans le sens inverse de celui attendu au cours de l'endommagement.

Enfin, si, on regarde l'évolution de la taille et du poids des carottes au cours des cycles (non présentés ici, mais que l'on peut retrouver dans le rapport de recherche n° 16-75-010-2008/16-010/02), seul le grès voit sa masse augmenter, ce qui tend à montrer qu'il n'était pas saturé avant l'essai (malgré la phase de resaturation de 24 heures), au contraire du calcaire saccharoïde et de la dolomie, qui ne voient pas leur masse évoluer alors que leur porosité est proche.

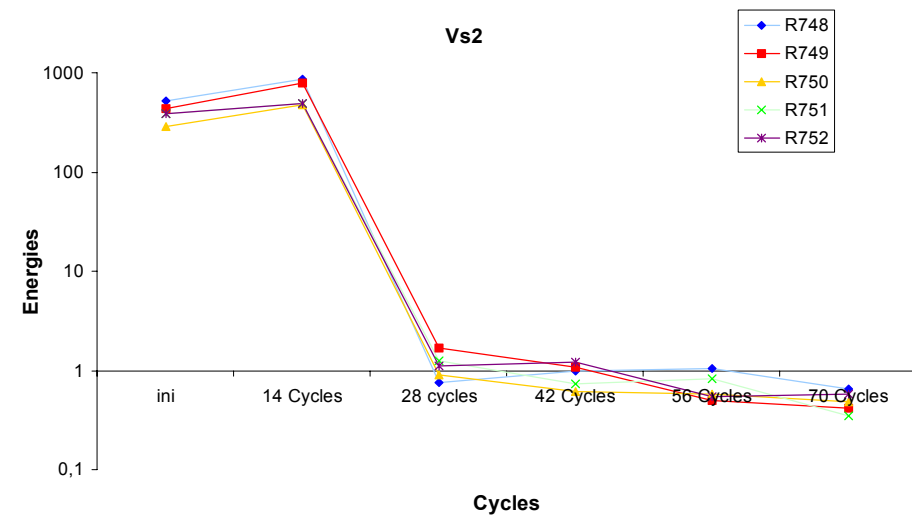
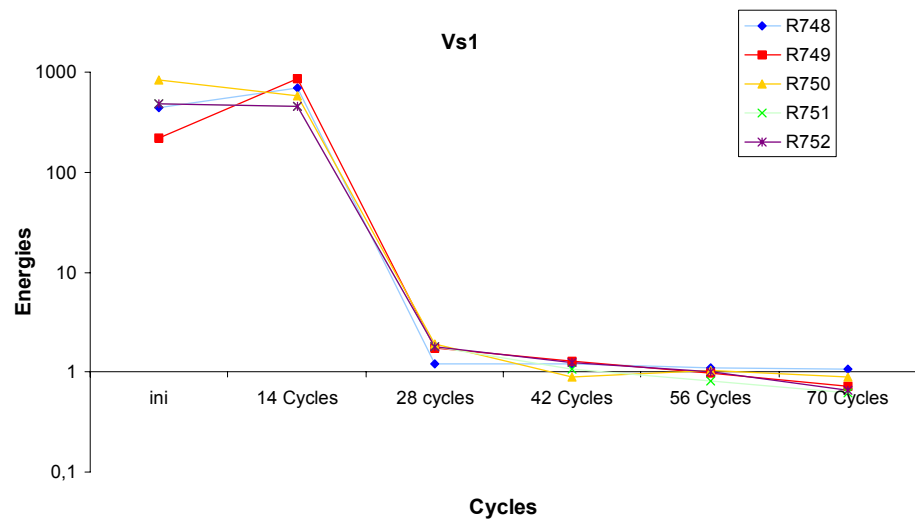
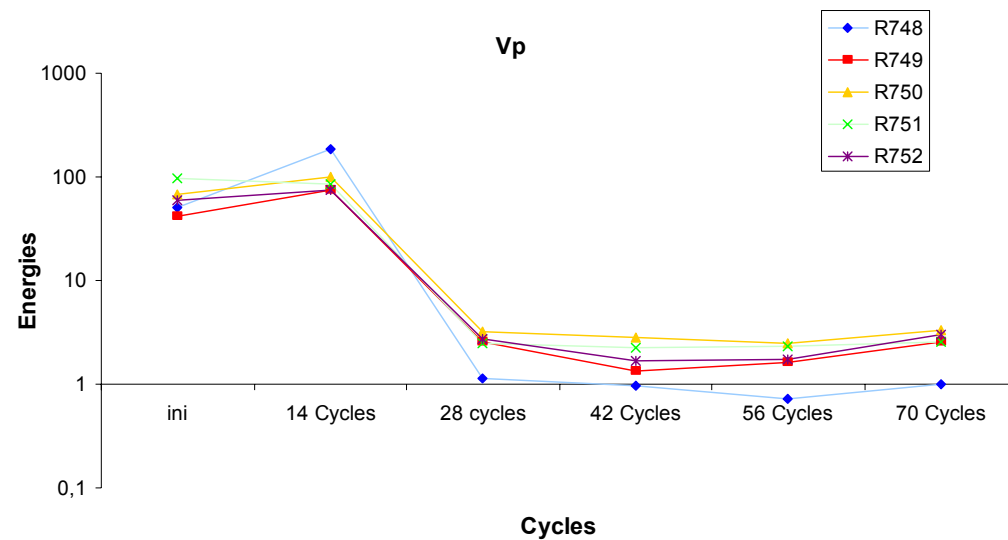


Figure 23 : Évolution des énergies en fonction des cycles – Grès des Vosges

Conclusions générales de l'étude :

Il a été observé précédemment (rapport interne sur les essais uniaxiaux n°16-75-011-2007/16-011/01) et [Martinez-Martinez et al, 2008], par exemple que l'endommagement de la roche lors d'un essai triaxial ou uniaxial se traduisait par une augmentation de l'énergie du signal puis une diminution brutale qui précédait directement la phase de rupture. Nous avons observé ici quasiment systématiquement une diminution de l'énergie entre la mesure initiale et la mesure à 14 cycles (voir rapport interne 16-75-010-2008/16-010/02). Ensuite, en fonction de la minéralogie des échantillons, et sans doute de leur degré de saturation et donc de leur sensibilité à l'eau, on observe ou bien une augmentation, même légère (gneiss, basalte, calcaire saccharoïde), signe d'un endommagement, même léger ou bien une diminution (marbre) ou bien un comportement plus complexe : il est en effet plus délicat de traiter les résultats du calcaire saccharoïde puisque les ruptures sont relativement précoces par rapport au nombre de mesures effectuées. De même en ce qui concerne le grès : les résultats semblent conformes au comportement attendu, à condition de considérer que les éprouvettes n'étaient pas initialement saturées et que l'application de cycles de gel / dégel a entraîné une saturation progressive, voire un remplissage des micro-fissures créées par endommagement. Ces observations demandent à être complétées lors de prochaines séries de mesures qui prendront en compte une meilleure phase de saturation initiale des éprouvettes.

De nombreuses questions restent en suspens sur le traitement des fréquences caractéristiques. En effet, même si la technique semble bien au point, les questions posées par l'analyse des résultats, entre autres sur la saturation initiale des éprouvettes demandent de considérer les résultats avec précaution : il n'est pas évident qu'il y ait eu endommagement très important, même pour les éprouvettes ayant subi 70 cycles de gel/dégel. Il semble néanmoins que l'on puisse dire que quelle que soit la minéralogie, l'onde P semble présenter une fréquence caractéristique proche de 0,2 MHz et dans une moindre mesure, de 0,4 MHz, et les ondes S1 et S2, des pics à 0,25, 0,5 MHz, et avec une intensité plus faible de 0,9 MHz. Ces résultats demandent à être interprétés plus finement, car on espérait plutôt avoir des pics différents selon les minéralogies. De plus, on retrouve fréquemment des spectres avec une allure plus resserrée pour les ondes P que pour les ondes S et avec des fréquences plus élevées, comprises entre 0 et 0,3 Mhz environ. Ceci s'explique par la nature même des ondes élastiques : une onde de compression est toujours plus facile à générer artificiellement et donc plus « nette » qu'une onde de cisaillement souvent « parasitée » par les réflexions des ondes P. C'est très certainement pour cette raison que les périodes étaient plus faciles à déterminer pour les signaux enregistrés pour l'onde P.

Le traitement effectué sur un signal « à vide » (c'est à dire sans éprouvette de roche, mais en mettant au contact l'émetteur et le récepteur) permet de comprendre et d'expliquer encore mieux ce phénomène. Lorsque l'on observe les spectres de fréquences pour les signaux « à vide », on s'aperçoit que pour l'onde P, les principales amplitudes les plus élevées sont à une fréquence de 0,2 et 0,4MHz. Pour l'onde S1, elles sont de 0,2, 0,5 et aux alentours de 1 MHz. Pour les ondes S2, elles sont de 0,45 0,75 et de 1MHz. Le pic à 0.25MHz est à nouveau présent mais est peu intense (cf. figure 15). Néanmoins, cela ne veut pas dire que tous les échantillons présentent les mêmes fréquences caractéristiques. Au contraire même pour une minéralogie très proche (calcaire dolomitique et saccharoïde), les valeurs varient légèrement.

Un travail d'interprétation des enregistrements reste donc nécessaire. Ceci est envisagé en collaboration avec J. Wasserman de l'IRSN. Il est prévu dans un premier temps de reprendre le traitement du signal sur les essais uni axiaux réalisés sur les grès de Valabres, et si des conclusions intéressantes se dégagent, les expérimentations à partir de cycles de gel-

dégel, en contrôlant les aspects liés à la saturations initiale et au nombre de cycles pourraient être reprises.

3.2.4. Synthèse des méthodes de caractérisation de la matrice rocheuse employées

Le travail réalisé a donc consisté principalement en un apport à l'étude de la caractérisation physique et mécanique de la matrice rocheuse à l'aide de méthode non-destructives. Les sollicitations mécaniques auxquelles les échantillons ont été soumis ont été de plusieurs types : uniaxiales (en rapport avec le plan de foliation), triaxiales et cycles de gel/dégel. J'ai été amenée, suivant les cas, à exploiter à la fois les vitesses des ondes élastiques et l'émission acoustique. Il a ainsi été proposé d'utiliser des techniques de traitement du signal usuellement utilisées en émission acoustique pour traiter les formes d'ondes enregistrées sur les vitesses des ondes élastiques. Ces travaux sont innovants et semblent relativement prometteurs, et il est maintenant nécessaire de continuer ce travail pour essayer d'aboutir à des résultats vraiment concluants.

3.3. Essais sur les discontinuités

La majorité des problèmes de stabilité en massifs rocheux provenant de la présence de discontinuités, il est particulièrement important de pouvoir en assurer une caractérisation fine, tant du point de vue géométrique que de celui de leurs propriétés mécaniques. Mon arrivée au LRT a coïncidé avec celle de la presse de mécanique des roches présentée en 3.1. Une partie de mon activité a donc été dédiée à la mise au point de procédures expérimentales particulières à la réalisation d'essais sur discontinuités.

3.3.1. Mise au point de procédures expérimentales

Une réflexion importante a initialement été menée pour s'approprier la connaissance de ce type d'essai : préalablement à la réalisation d'un essai mécanique, il est nécessaire de procéder à une préparation de l'échantillon. Chaque éponte est scellée dans une demi-boîte de cisaillement, à l'aide de mortier de forte rigidité (figure 4.5). La discontinuité (naturelle ou non) à tester est en général placée à l'horizontale au niveau de la séparation des deux demi-boîtes.

Le travail initial de finalisation des procédures expérimentales (essai de chargement sous contrainte normale constante), a été réalisé en collaboration avec le GHYMAC, lors du stage de Baptiste Rousseau, grâce à la réalisation d'essais sur fractures naturelles ou créées par fendage sur les gneiss d'Ax-les-Thermes. Il a mis en évidence l'importance de la réalisation d'au moins trois cycles de charge-décharge (méthode décrite dans [Gentier 1986], [Gentier, 2004] et [Marache et al, 2008]) afin d'assurer un bon emboîtement des épontes préalablement à l'essai de cisaillement décrit plus bas. Pour ce faire, il s'agit, épontes en place et tout déplacement bloqué dans le plan de l'éponte, d'appliquer des chargements verticaux cycliques (donc normaux au plan de l'éponte) sur une demi-boîte. Par ailleurs, il est nécessaire de positionner les capteurs de déplacement au plus près de la fracture afin de n'enregistrer que la fermeture de cette dernière et non la déformation de la roche saine ;

cependant, si tel n'est pas le cas, on pourra s'affranchir de la déformation de la roche saine en soustrayant cette dernière à la déformation totale afin de ne conserver que la déformation de la fracture au sens strict.



Figure 24. Exemple de joint de calcaire scellé en place, essai réalisé au LRPC de Toulouse a- vue de dessus demi-boîte inférieure uniquement, b- vue de côté, joint en place.

Le comportement à la compression simple d'un joint est présenté sur la Figure 25. La phase initiale, dite « de serrage » correspond à la remise en place des deux épontes. Cette phase se caractérise par une augmentation de la raideur normale, K_n , définie par le rapport $\Delta\sigma_n/\Delta u_n$, (variation de contrainte normale rapportée à la variation de déplacement normal), avec l'augmentation de la charge appliquée. La raideur croît jusqu'à la valeur de la rigidité de la roche saine.

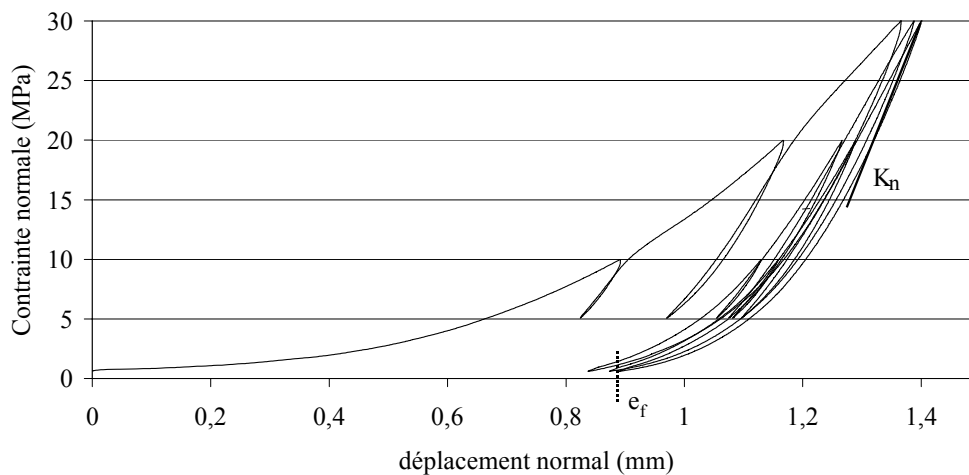


Figure 25 : Comportement à la compression simple d'une discontinuité naturelle de gneiss

Caractéristiques de la matrice naturelle d'Ax-les-Thermes : $\sigma_c = 77 \text{ MPa}$, $\sigma_t = 9 \text{ MPa}$ [Ar11]

Le comportement à la décharge, pour les premiers cycles, dépend du matériau étudié : l'hystérésis qui se manifeste lors des cycles peut être plus ou moins importante en fonction du joint testé, en particulier de son ouverture initiale, de l'imbrication des épontes et du remplissage éventuel. On peut noter qu'une mauvaise mise en place des épontes entraînera une augmentation de la déformabilité normale du joint. On constate (expérimentalement) que lorsque plusieurs cycles sont réalisés, ils finissent par se superposer. A la décharge, il restera une fermeture normale permanente (e_r sur la figure 4.6), celle-ci sera d'autant plus faible que l'emboîtement initial est bon.

La fermeture maximale du joint est la valeur limite de la fermeture du joint. Elle décroît quand la résistance à la compression simple de la roche constituant les épontes du joint diminue, à rugosité équivalente [CFMR 2000]. Il est également important de noter que la résistance en traction d'un joint rocheux est souvent considérée comme nulle.

3.3.2. Cisaillement sous contrainte normale constante (norme XP P94-424)

Description de l'essai

L'essai de cisaillement direct ou CNC (pour Contrainte Normale Constante) est décrit dans la norme XP P-94-424 [Afnor, 1993], mais également dans [Mazoleni, 1997] et le « blue book » [ISRM 2007] qui présente une mise à jour des recommandations émises par la société internationale de mécanique des roches pour la réalisation d'essais. L'essai CNC est également décrit par la norme américaine ASTM D 5607-02 [ASTM 2002]. Il consiste à imposer un déplacement relatif des deux épontes parallèlement à la discontinuité. En général, ce déplacement relatif s'obtient en maintenant en place une demi-boite et en appliquant une vitesse constante (selon un axe horizontal) à l'autre demi-boite. Ceci peut être effectué avec application d'une contrainte constante différente de zéro, ou bien « libre de toute contrainte normale ». On enregistre durant l'essai les déplacements relatifs des épontes dans la direction du cisaillement (u_t) et dans la direction normale (u_n). La Figure 26 présente le résultat d'un essai CNC réalisé au LRPC, la Figure 26a, la courbe contrainte de cisaillement / déformation tangentielle et la Figure 26b la courbe de dilataance.

On constate qu'au cours de l'essai, la contrainte de cisaillement augmente progressivement avec le déplacement tangentiel jusqu'à atteindre la résistance au pic (τ_p), puis elle diminue progressivement pour atteindre un palier caractérisant la résistance résiduelle (τ_r). La première partie de la courbe est pseudo-linéaire, caractérisée par la pente K_s , raideur tangentielle du joint. Les valeurs des résistances au pic et résiduelle et de raideur tangentielle dépendent de la contrainte normale appliquée au cours de l'essai ainsi que de la rugosité du joint dans la direction de cisaillement. La partie non linéaire de la courbe, avant le pic, correspond à un endommagement progressif des aspérités. C'est cependant une fois le pic passé que la dégradation des surfaces de friction peut réellement être observée.

La courbe (u_t , u_n), ou courbe de dilataance (Figure 26b), permet de caractériser l'ouverture du joint². Cette courbe se caractérise par une phase de contractance pour de faibles déplacements tangentiels suivie de la dilataance proprement dite (ouverture). L'angle de dilataance i , est défini par la pente de la courbe par $i = \arctan(\Delta u_n / \Delta u_t)$; il atteint, en général, un maximum pour un déplacement tangentiel proche du pic de cisaillement.

² Contrairement au comportement sous contrainte normale pure, un déplacement vertical positif est synonyme ici d'ouverture de la fracture.

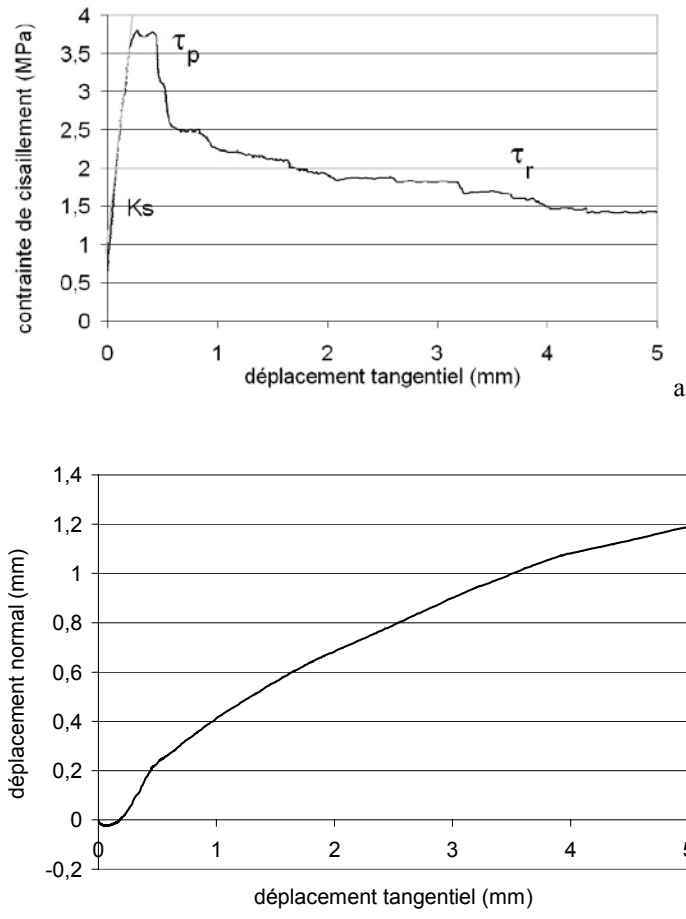


Figure 26 : Réponse d'un joint naturel à un essai de cisaillement a- courbe contrainte/déformation, b- courbe de dilatance

essai réalisé sous 2MPa de contrainte normale sur du gneiss d'Ax-les-Thermes, surface cisailée 55 cm². Matrice : $\sigma_c = 77$ MPa, $\sigma_t = 9$ MPa

Plus la contrainte normale appliquée est faible, plus le déplacement tangentiel des épontes est aisé. Si la contrainte normale augmente, le déplacement ne devient possible qu'après écrêtage des aspérités. La rupture dépend de la géométrie des épontes mais également des caractéristiques mécaniques de la roche. Ainsi, pour appréhender au mieux le comportement du joint rocheux, il est nécessaire de connaître l'ensemble des caractéristiques minéralogiques et morphologiques du joint.

Principaux résultats obtenus

Plusieurs séries d'essais sur discontinuités naturelles ou créées par fendage ont été réalisées sur différentes minéralogies, principalement les gneiss d'Ax-les-Thermes et de Valabres et le marbre de St Bât. Les deux gneiss ont été étudiés avec le même protocole expérimental, dans le but principal d'obtenir des paramètres à entrer dans une loi de comportement adaptée.

La Figure 27 présente une synthèse des résultats d'essais obtenus sur les gneiss de Valabres, à savoir les points permettant de tracer l'enveloppe de rupture et l'enveloppe du comportement résiduel. On constate que les trois essais réalisés s'alignent à peu près correctement sur une droite, et il est ainsi aisé de proposer un critère de Coulomb, à la fois pour la résistance au pic et pour la contrainte résiduelle. On obtient ainsi les propriétés données dans le Tableau 5.

On ne peut pas parler de cohésion au sens strict, bien sûr, puisque le joint est initialement ouvert, mais, par commodité, on reprend les termes de la droite de Coulomb. C'est une « cohésion apparente » qui rend compte de la rugosité du joint et de l'imbrication des épontes.

Tableau 5 : Propriétés des critères de Coulomb proposés pour le gneiss de Valabres

	« cohésion » MPa	«φ » (°)
Critère au pic	2,65	25
Critère résiduel	0,58	20

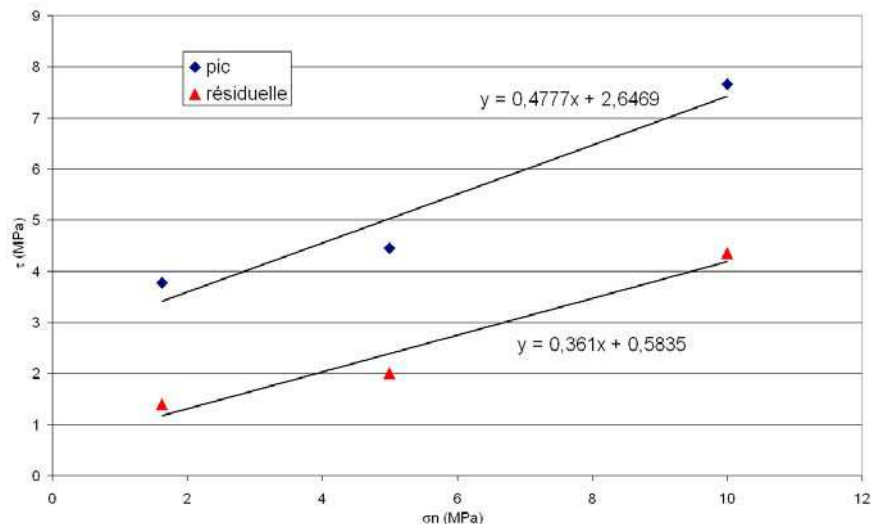


Figure 27 : Proposition d'enveloppe de rupture et résiduelle – gneiss de Valabres

On peut comparer ces résultats à ceux que l'on a obtenus sur les gneiss d'Ax-les-Thermes [Ar9]. En effet, même si dans ce dernier cas, pour le pic, on a une pseudo-cohésion nulle et un angle de 51°, le comportement est également linéaire jusqu'à 10 MPa, c'est à dire pour des contraintes normales relativement faibles. Au delà, en effet, en ce qui concerne le critère de pic, on observait un infléchissement marqué de la droite, pour se rapprocher d'une forme parabolique conforme à ce qu'on trouve dans la littérature (Homand et al., 2001, Maksimovic, 1996, 2002). Ici, n'ayant que peu de carottes, nous avons préféré nous concentrer sur la réalisation d'essais où les contraintes normales imposées se rapprochent de celles se rencontrant *in-situ*.

La méthode d'interprétation choisie peut se contenter d'obtenir un critère de Mohr-Coulomb ou bien essayer d'aller au-delà, pour rendre mieux compte du comportement dilatant du joint (par exemple). Dans [Ar9], je propose une exploitation plus poussée de l'essai mécanique, dans une perspective de modélisation numérique du comportement du joint avec le logiciel UDEC : l'idée principale du travail exposé est de « caler » les paramètres des lois de comportement du joint présents dans UDEC sur une courbe expérimentale (Figure 28), pour ensuite l'appliquer au comportement du massif.

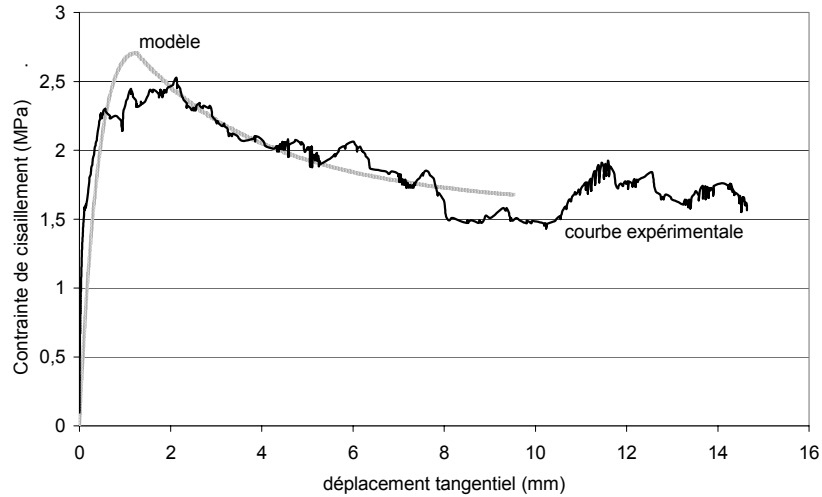


Figure 28 : Comparaison courbe expérimentale / modèle - courbe contrainte / déplacement [Ar9]

La courbe « modèle » est obtenue en calant au mieux les résultats d'une simulation d'un essai de cisaillement par le logiciel Udec, en utilisant le modèle de comportement « continuous yielding »

Dans le cadre de la thèse de Nhan Hoang (soutenue le 8 décembre 2010, directeur de thèse J. Sulem), nous avons choisi d'investiguer, entre autre, l'influence des paramètres d'essai (vitesse de cisaillement, contrainte normale appliquée, déplacement maximal atteint, etc.) sur le joint. Douze discontinuités naturelles ont été testées et ont été classées en trois groupes de quatre discontinuités de rugosité similaire (nous reviendrons dessus plus bas). Chaque groupe a été soumis à une contrainte normale différente : 1,5, 3 et 5 MPa. Nous avons fait varier la vitesse de cisaillement au sein de chaque groupe (5, 10 et 20 $\mu\text{m/s}$, plus une discontinuité dont nous avons changé la vitesse de cisaillement au cours de l'essai). Nous avons pu mettre en avant différentes caractéristiques du comportement [Ac16] :

- plus la vitesse augmente, plus la résistance au pic diminue, pour une même valeur de contrainte normale (Figure 29) ;
- la vitesse de cisaillement n'influe pas sur la valeur de la contrainte résiduelle ;

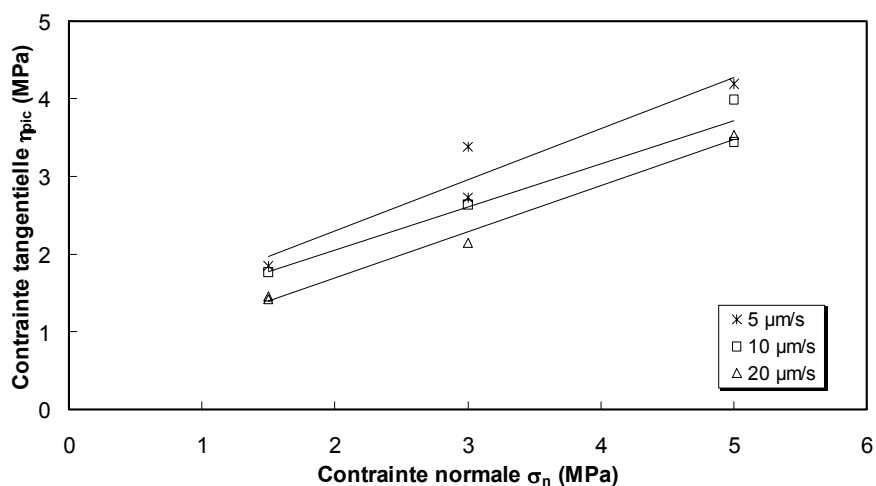


Figure 29. Influence de la vitesse de cisaillement sur la contrainte au pic

- il semble que lorsque la vitesse de cisaillement est élevée (20 $\mu\text{m/s}$), et pour les valeurs de contraintes normales testées, on n’observe pas la présence de pic de contrainte de cisaillement ;
- la valeur choisie de 7 mm de déplacement relatif tangentiel maximum ne permet pas forcément d’obtenir une valeur de contrainte résiduelle ;
- on ne note pas d’influence due au changement de la vitesse de cisaillement pendant l’essai pour la plage de vitesses choisie.

La rigidité tangentielle se mesure sur la partie linéaire des courbes contrainte-déplacement tangentiel (Figure 26a). La Figure 30 présente les valeurs de rigidité tangentielle obtenues en fonction de la contrainte normale imposée. On observe d’une part que l’augmentation de la contrainte normale implique une augmentation de la rigidité tangentielle et d’autre part qu’il n’y a pas d’influence visible de la vitesse de cisaillement sur la rigidité tangentielle.

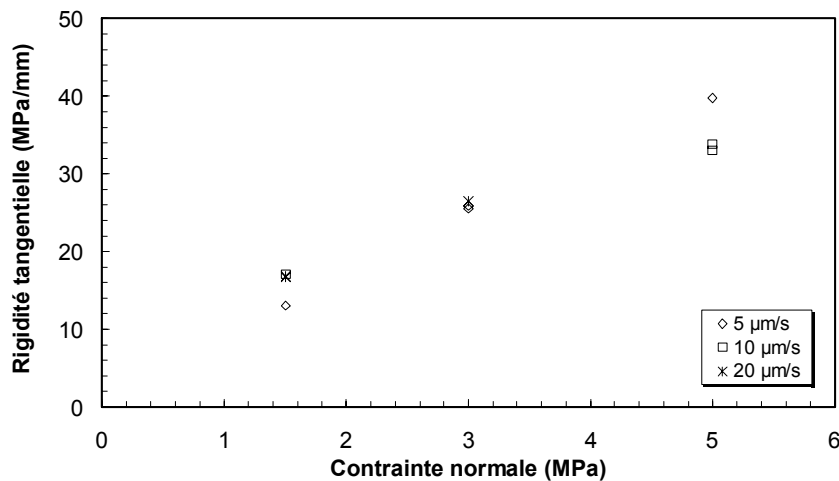


Figure 30. Évolution de la rigidité tangentielle en fonction de la contrainte normale et de la vitesse de cisaillement

3.3.3. Autres trajets de chargement

Même s’il s’agit du seul essai régi par une norme française, l’essai CNC ne permet de reproduire que peu de cas réels, essentiellement le glissement d’un bloc sous son propre poids, le long d’une surface de rupture. Pour pouvoir rendre compte d’autres cas *in situ* (blocs en tunnel, par exemple, cf Figure 31) ou bien pour acquérir les paramètres adaptés à d’autres lois de comportement, il faut envisager d’autres chemins de chargement. Il est ainsi importants de réaliser en laboratoire les “bons” essais, qui correspondent au mieux au comportement observable en place.

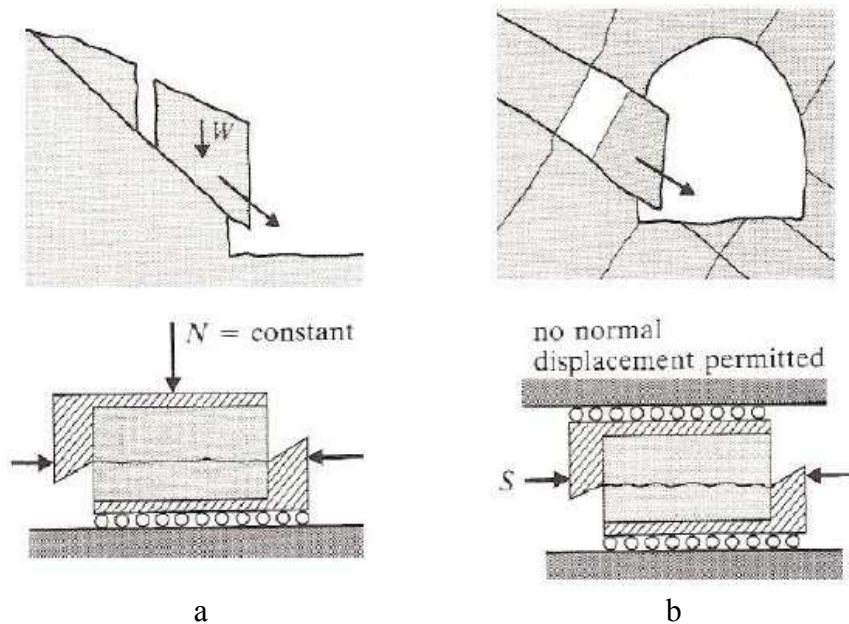


Figure 31 : Exemple de mobilisation de blocs rocheux [Zhao 2008] ; a- les essais CNC représentent bien un glissement sous son propre poids, b- les essais KNC rendant mieux compte de mouvements contraints au sein de roche fissurée

Il existe donc d'autres chemins de chargement qui peuvent être réalisés. J'ai été amenée à proposer des procédures expérimentales pour certains d'entre eux :

- L'essai à force normale F_n constante (FNC) au cours du cisaillement. Il est proche du précédent, mais la force est maintenue constante au cours de l'essai (et non pas réajustée en permanence pour compenser les variations de la surface des épontes réellement en contact au cours de l'essai). Cet effort est donc insensible à la variation de la surface de contact entre les deux épontes au cours du cisaillement (la surface initiale diminue du fait du déplacement tangentiel en cours).
- L'essai à volume contrôlé (VC). Le déplacement normal est maintenu constant en faisant varier, par asservissement, la contrainte normale : elle est augmentée en cas de dilatance ou diminuée en cas de contractance. Ce type d'essai a été réalisé au LRPC dans le cadre de la thèse de J. Duriez ([Duriez, 2009] et [Ar10]). On montre sur la Figure 32 les déplacements imposés et les réponses en contraintes.

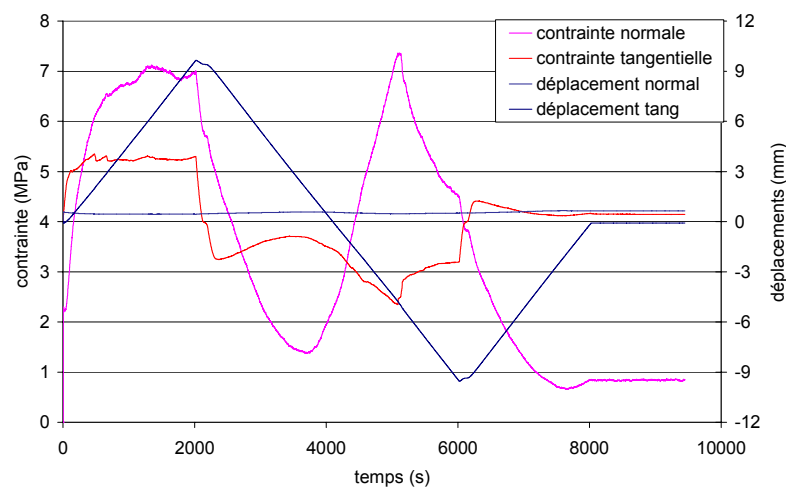


Figure 32 : Chargement de l'essai à déplacement normal constant – gneiss de Valabres

- L'essai à rigidité normale constante (KNC). La rigidité $\Delta\sigma_n/\Delta u_n$ est maintenue constante grâce à un asservissement adéquat du dispositif. Ce rapport représente la rigidité normale du massif entourant la fracture, qu'il ne faut pas confondre avec la raideur normale K_n , caractéristique du joint. Dans cet essai, la contrainte normale varie donc proportionnellement au déplacement normal au joint. C'est l'essai qui représente le mieux le chemin des contraintes in-situ dans le cas du chargement en tunnel par exemple (cf. Figure 27). Ce type d'essai a également été réalisé au LRPC de Toulouse dans le cadre du travail de thèse de Nhan Hoang (Figure 33).

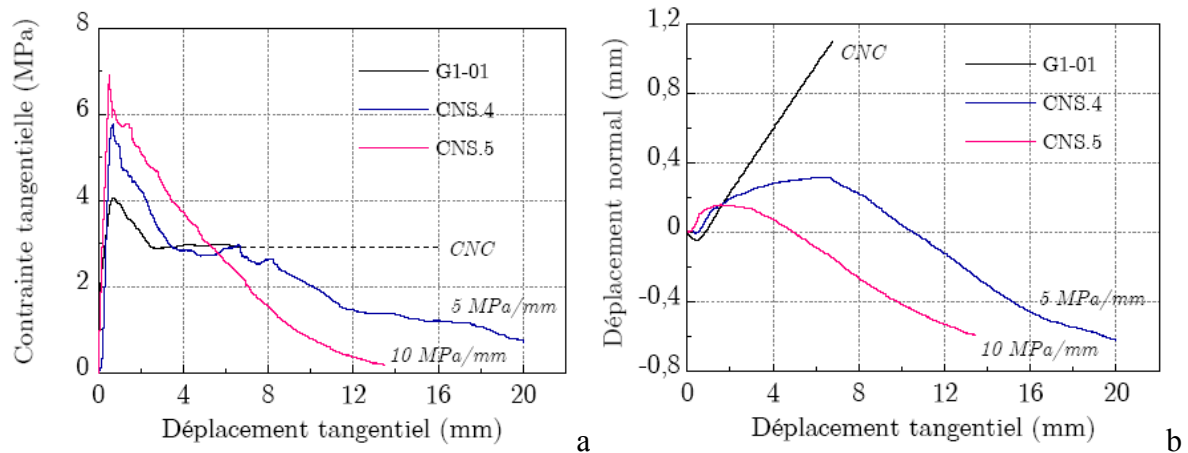


Figure 33 : Essai à rigidité constante pour une contrainte normale initiale imposée de 5 MPa. a- contrainte tangentielle en fonction du déplacement tangentiel, b- Courbe de dilatance

Les courbes réalisées sous contrainte normale constante (notées CNL) sur les courbes, correspondent à une rigidité de 0 MPa/mm. On observe une augmentation de la résistance au pic, concomitante avec la diminution de la résistance résiduelle et de la dilatance lorsque la rigidité augmente. Essais réalisés sur du marbre de St Béat – thèse de N. Hoang

- L'essai oedométrique : cet essai n'est absolument pas courant. Il a été réalisé dans le cadre de la thèse de Jérôme Duriez et du projet Stabrock, afin d'obtenir les paramètres de la loi d'interface incrémentale non linéaire [Darve et al., 2004]. Le principe mis au point est de cisailier le joint, puis, déplacement latéral bloqué, d'effectuer un cycle de charge / décharge. Nous avons choisi d'effectuer 4 compressions simples aux 4 valeurs de déplacements tangentiel fixé suivantes : 0,15 mm, 0,3 mm, 1 mm et 10 mm. Ces valeurs ont été choisies en fonction des résultats des essais à contrainte normale imposée afin d'avoir un cycle de charge / décharge dans la phase pré-pic (0,15 mm), une valeur quasiment au pic (0,3 mm) une valeur rapidement en post-pic (1 mm) et enfin pour la valeur de déplacement tangentiel correspondant au comportement résiduel (10 mm). La Figure 34a présente le trajet de chargement effectivement réalisé pour l'essai de cisaillement oedométrique, et la Figure 34b les réponses, en terme de déplacement normal et contrainte tangentielle.

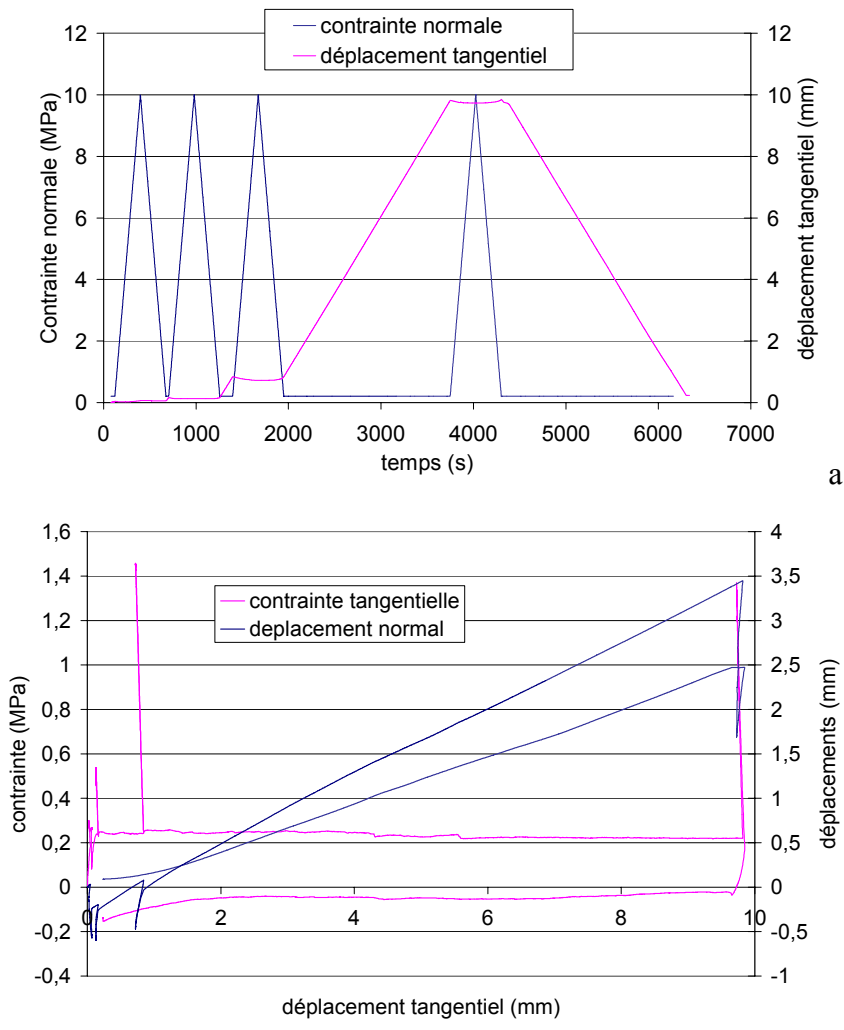


Figure 34 : Essai de cisaillement de type oedométrique – gneiss de Valabres a- Trajet de chargement b-Réponse

3.3.4. Influence de la rugosité des joints

La morphologie actuelle d'un joint rocheux dépend de la nature de la roche (minéralogie, conditions de dépôt...) et de son histoire (formation, présence d'eau, recristallisations secondaires, etc.). Il est aisé de comprendre que la morphologie guidera le comportement mécanique du joint : le glissement sera aisé pour un joint lisse, et au contraire, le mouvement de cisaillement sera d'autant plus gêné que la rugosité du joint sera importante (Barton et Choubey, 1977, Jiang et al., 2006, Grasselli et al, 2002).

Avant de poursuivre, il est nécessaire de redéfinir quelques termes :

- un joint est constitué par deux épontes rocheuses : ce sont les surfaces qui délimitent le joint ;
- la morphologie définit la forme de la surface de l'éponte rocheuse ; la rugosité se définit à l'échelle millimétrique tandis que les ondulations se mesurent plutôt à partir de l'échelle décimétrique ;
- la rugosité est la grandeur qui permet de caractériser l'état de surface d'une éponte. Les irrégularités la composant sont définies par comparaison avec une surface

"moyenne", et sont classées en deux catégories : des aspérités ou "pics", et des cavités ou "creux". L'étendue (une longueur) correspond à la hauteur maximum entre le pic maximal et le creux maximal observé sur la surface analysée. Pour des études simples d'instabilité ou de travaux souterrains, la rugosité est estimée sur le terrain et les épontes sont simplement qualifiées de « lustrées (usées), lisses ou rugueuses » en fonction de l'impression obtenue au toucher. On peut plus précisément caractériser précisément cette rugosité en laboratoire (Figure 35) à l'aide de profilographes mécaniques à palpeurs ou à aiguille ou profilographe optique (profilomètre laser).

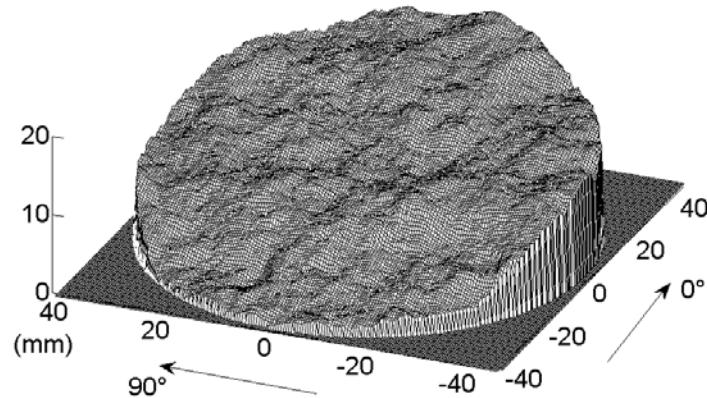


Figure 35 : Morphologie de l'éponte inférieure d'un joint de marbre [Ac18]

Méthodes descriptives de la rugosité

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de décrire la morphologie des joints. Une méthode empirique, et très utilisée pour caractériser la rugosité des joints, a été proposée par Barton (1977). Le degré de rugosité des joints est défini par le JRC (*Joint Roughness Coefficient*) sur une échelle de 1 à 20. Le JRC est donc estimé grossièrement, uniquement à partir d'approximations basées sur des profils 2D, mais il est très utilisé, car Barton a su décliner sa méthode pour de nombreux cas d'application, en particulier dans les travaux souterrains.

Si l'on souhaite faire une description plus mathématique de la rugosité, on peut alors faire appel à différents paramètres globaux :

- Le CLA (Central Line Average) et le RMS (Root Mean Square) qui caractérisent tous les deux la globalité de la surface en utilisant les hauteurs des points constituant une éponte, calculées par rapport à un plan de référence qui peut être déterminé arbitrairement ou résulter d'un calcul tel que la méthode des moindres carrés. Le CLA est la moyenne arithmétique de ces hauteurs alors que le RMS est la racine carrée de la moyenne des carrés des hauteurs.
- La colatitude 3D (Figure 36b) est l'angle formé entre un axe vertical de référence et la normale à une facette de la surface de l'éponte considérée, la facette étant définie par un minimum de trois points. Les colatitudes étant des données directionnelles, les paramètres statistiques découlant de leur distribution doivent être calculés par les équations de statistiques directionnelles [Mardia, 1972].

Enfin, on peut également utiliser des paramètres directionnels. Leur calcul se base sur les différences de hauteur entre deux points consécutifs d'un même profil. Ces paramètres sont particulièrement intéressants pour relier le comportement mécanique en cisaillement à la rugosité des épontes caractérisée dans la direction de cisaillement :

- Z2 est la racine carrée de la moyenne quadratique de la dérivée première des hauteurs ; il est assimilable à la notion de pente moyenne ;
- Z3 est la racine carrée de la moyenne quadratique de la dérivée seconde des hauteurs ; il est assimilable à la notion de rayon de courbure ;
- Z4 correspond à la proportion de pentes, soit positive, soit négative, non compensée sur la longueur du profil considéré ; Z4 permet donc d'avoir une idée sur la proportion de matériel mobilisable au cours d'un essai de cisaillement ; il est extrêmement sensible à la direction et au sens dans lequel il est calculé ;
- Rl, la rugosité linéaire, est le rapport de la longueur réelle du profil à la longueur de celui-ci projeté sur une ligne de référence.
- La colatitude 2D (Figure 36a) correspond à l'angle défini entre une horizontale et le segment formé par deux points consécutifs d'un profil, elle peut donc être positive ou négative. De même que pour les colatitudes 3D, leur distribution statistique se caractérise par les statistiques directionnelles [Mardia, 1972].

A partir des expériences réalisées par Flamand (2000), Lopez (2000) a montré que le paramètre morphologique le plus statistiquement représentatif du comportement mécanique en cisaillement est le paramètre Z4 alors que le paramètre Z3, lui n'influence pas le comportement mécanique en cisaillement.

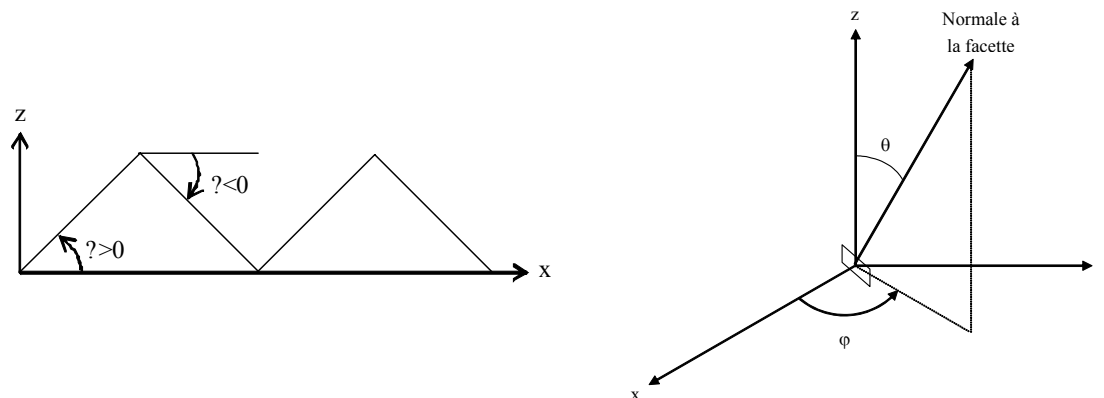


Figure 36 : Définition des colatitudes 2D et 3D.

On peut également utiliser des méthodes géostatistiques, qui consistent à décrire la surface de la fracture en recherchant des corrélations spatiales sur les hauteurs d'une surface donnée. [Gentier, 1986], [Marache 2002] proposent une caractérisation de la rugosité du joint rocheux au travers des renseignements apportés par le variogramme³ des hauteurs de la surface ou des résidus des hauteurs pour les surfaces présentant une dérive topographique. Cette caractérisation peut également être affinée en étudiant le variogramme des dérivées des hauteurs [Chiles 1992], [Marache 2002] ou bien encore par l'utilisation du variogramme généralisé [Chiles 1979].

Enfin, l'analyse fractale introduite par [Mandelbrot 1975] permet d'estimer la longueur (l'aire) développée d'un profil (d'une surface) irrégulier(e) à partir de la longueur (l'aire) de l'objet euclidien supposé élémentaire. Kulatilake et al., [1995], Yang et al., [2001] et Jiang et al., [2006] ont étudié la possibilité d'utiliser une dimension fractale pour obtenir une mesure de la rugosité des fractures rocheuses. De nombreuses méthodes ont été développées pour estimer la dimension fractale d'un joint rocheux.

³ le variogramme est une grandeur mathématique qui caractérise la structuration de données dans l'espace. Soit une variable aléatoire Z définie en deux points séparés d'une distance h, le variogramme est la demi-variance de la différence des deux valeurs de la variable : $\gamma(x, x+h) = 0,5 \text{ var}(Z(x) - Z(x+h))$.

L'ensemble de ces méthodes propose des descriptions des joints rocheux. L'une ou l'autre sera à privilégier en fonction de l'utilisation que l'on souhaite faire de la description et des moyens financiers dont on dispose.

Résultats obtenus

Dans le cadre de la thèse de Nhan Hoang sur les marbres de St Béat, nous avons pu mettre   profit les contacts existant avec le GHYMAC de l'Université de Bordeaux. Le travail portait sur la caractérisation mécanique de joints naturels de marbre soumis   des essais de cisaillement   différentes contraintes normales constantes et différentes vitesses de cisaillement. Gr ce   la collaboration avec le GHYMAC, nous l'avons enrichi d'une analyse poussée de l'évolution de la morphologie 3D des joints grâce   la réalisation de profils 3D de rugosité avant et après essais réalisés   l'aide d'un profilomètre laser.

Ce travail est encore en cours d'analyse mais les résultats très prometteurs [Ac16, Ac18, Ac19, Ac21] et Figure 37 m'incitent   continuer dans cette voie pour mieux comprendre les liens entre rugosité des surfaces et comportement mécanique. Il reste également   voir l'application de ces résultats du point de vue du comportement du massif rocheux.

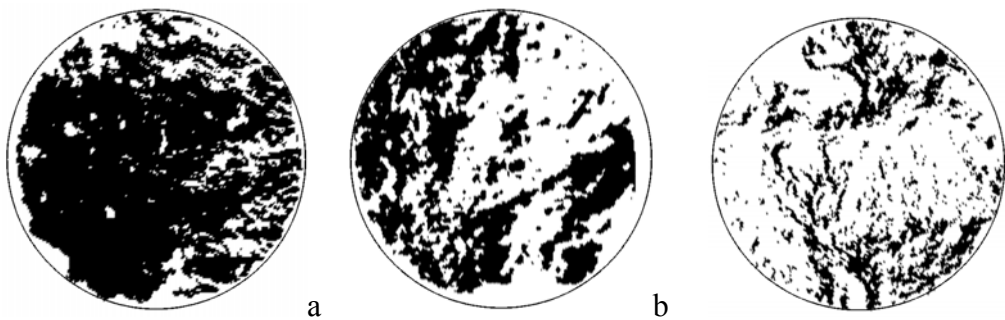


Figure 37 : Localisation des zones de contact (en noir) de joints naturels de marbre de St Béat soumis   un cisaillement sous contraintes normales de 30 kN (a), 20 kN (b) and 10 kN (c)

On observe bien que plus la contrainte normale est importante, plus la zone de contact après essais est importante, ce qui traduit un endommagement de la surface de l' ponte

J'ai ainsi proposé, dans le cadre d'une opération de recherche en cours de montage au LCPC, sur le stockage de CO₂, de poursuivre ses travaux en repartant non plus de fractures naturelles, mais de répliques (en mortier). L'idée serait d'altérer artificiellement et   différents degrés des surfaces de discontinuités initialement identiques et de comparer leur morphologie et comportement mécanique après cette altération qui pourrait être physique ou chimique.

3.4. Synthèse partielle

Une partie importante de mon travail a été orientée vers la mise au point, la réalisation et l'interprétation d'essais de laboratoire. L'ensemble de ce travail a pu être réalisé grâce aux moyens expérimentaux disponibles et au personnel qualifié présent au LRPC de Toulouse.

J'ai ainsi été amenée   travailler sur la caractérisation mécanique   la fois de la matrice rocheuse et des discontinuités, du point de vue de la caractérisation de phénomènes, de

l'étude de l'endommagement (évolution des vitesses des ondes élastiques, émission acoustique) et de la caractérisation morphologique et mécanique des discontinuités.

Un gros travail de développement expérimental a été réalisé, aussi bien du point de vue des essais sur la matrice rocheuse que sur les discontinuités, et des pistes supplémentaires de recherche ont été identifiées. Il reste à interpréter une partie de nos résultats expérimentaux en terme de loi de comportement. Une des pistes de réflexion actuelle est, en particulier, de continuer à travailler sur l'identification des mécanismes déclencheurs des instabilités, et les lois de comportements y afférentes, afin, si possible de les inclure dans les modèles de comportement des ouvrages décrits ci-après. On reprendra cet aspect dans le chapitre(6) dédié aux perspectives de ce travail.

4. Comportement des ouvrages

Qu'il s'agisse d'essais de laboratoire ou de l'analyse structurale du massif, un des buts principaux est de pouvoir dimensionner au mieux les ouvrages à construire au sein du massif étudié, c'est-à-dire en visant l'optimisation en termes de sécurité et de coût pour le maître d'ouvrage. Ainsi, j'ai été amenée à travailler sur différents aspects liés au dimensionnement des ouvrages, qu'il s'agisse de fondations au rocher, de stabilité de talus ou de tunnels.

De plus, nos forts liens avec les acteurs locaux nous placent dans une situation favorable pour rassembler des données, suivre la vie d'ouvrages anthropiques (tunnels, déblais rocheux, fondations au rocher, etc.) ou naturels (instabilités de pentes), réaliser des analyses a posteriori, vérifier le caractère applicable –ou non- des méthodes. Cette dimension rentre pleinement dans le rôle d'une ERA qui se veut entre autres une antenne de terrain des recherches menées avec le LCPC.

4.1. Modélisation

Pour pouvoir rendre compte du comportement d'un massif rocheux soumis à des sollicitations anthropiques (rectification de virage, creusement de tunnel, mise en place de fondations au rocher, etc.), il existe plusieurs logiciels de calcul. Le choix de tel ou tel se pose essentiellement en fonction de ce que l'on souhaite obtenir et de ce que l'on cherche à modéliser. Ainsi, j'ai choisi de développer mon travail sous l'angle de la prise en compte raisonnée des données de fracturation afin de conduire à une modélisation réaliste du massif étudié (c'est une partie du travail évoqué en 2.1) qui conduit directement au modèle structural à privilégier. Cette approche a été menée en se basant sur des cas concrets, tel le creusement du tunnel de St Bât [Ar7, Ac15, Ac10, Ac9], les fondations du viaduc sur le Viaur [Ac11] ou la création des grands déblais autour d'Ax-les-Thermes [Ar8, Ac15, Ac22, Com8] ou au niveau des lacets du Pallat [Ac12, Com6].

Pour nourrir ces modèles du point de vue mécanique, je privilégie le choix de lois de comportement simples, et déjà implantées, en m'appuyant sur les dispositifs expérimentaux du laboratoire de Toulouse, et en menant une réflexion sur les paramètres à prendre en compte, au lieu de proposer de nouvelles lois spécifiques [Ar9]. C'est un choix qui permet la diffusion de ce travail auprès des donneurs d'ordres et qui lui donne ainsi un caractère plus général, car non spécifique à un massif particulier ou à un logiciel particulier.

Les différents degrés de complexité pour la modélisation d'un massif rocheux, vont être décrits ci-après, en les illustrant par des exemples concrets.

4.1.1. Modèle simple : « classification des massifs rocheux »

Le principe des méthodes dites de « classification des massifs rocheux » repose sur une analyse globale du massif ; les différents paramètres, agglomérés afin d'obtenir une note globale simple à utiliser, donnent un résultat nécessairement peu représentatif de la réalité du massif et donc pas forcément adapté à un bon rapport ingénierie/sécurité.

Barton [1974] (indicateur : Q) et Beniaowski [1976] (indicateur RMR) ont développé des méthodes de classification des massifs rocheux permettant le dimensionnement global des tunnels en se basant sur des données facilement accessibles, mais ne permettant pas la prise en compte des particularités locales des massifs (existence de dièdres ou de glissements plans majeurs). Ces méthodes ont ensuite été développées par les auteurs pour prendre en compte de plus en plus de spécificités, et ([Barton & Grimstad, 1994], [Barton, 1999a], [Beniaowski, 1989]) pour être appliquées à d'autres cas, essentiellement les talus rocheux ou les mines ([Laubscher, 1990], [Rajmeny *et al.*, 2004]).

Le propos de ce mémoire n'est pas reprendre toutes ces méthodes. Les lecteurs qui voudraient avoir des précisions pourront se référer à AFTES [2003] qui présente les recommandations relatives à la « caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains » et reprend en annexe les deux systèmes d'évaluation semi-empiriques précédemment cités.

La limite de ce type de classification est, entre autre, mise en évidence par Sirieys [2001]. Il souligne que les notes globales ou qualificatifs retenus pour les massifs ne sont pas des caractéristiques intrinsèques de celui-ci et doivent être utilisées avec précaution. L'auteur souligne entre autres les caractéristiques suivantes comme devant être utilisées avec parcimonie :

- les paramètres d'orientation : familles structurales, orientation, pendage, fréquence, caractéristiques spécifiques des joints (degré de séparation, caractéristiques mécaniques, etc.)
- le champ géostatique et son anisotropie (état des contraintes avant la réalisation de l'ouvrage)

Enfin, il montre plusieurs exemples de notes a priori identiques mais où le milieu naturel est pourtant différent et les solutions d'ingénierie absolument pas comparables et il insiste sur le caractère fortement partial de ce type d'approche.

Mis à part les trois méthodes précédemment citées (AFTES, Barton, Beniaowski), qui sont de loin les plus utilisées en France (ex : Escoffier *et al.*, 1999), on peut citer différents auteurs qui proposent d'autres classifications (en fonction des objectifs recherchés), mais qui ne permettent pas forcément d'aboutir à un soutènement (l'application concrète pour l'ingénieur n'est alors pas directe). Deere et Miller [1966] (cités dans [Ramamurthy, 2004]) ont proposé une classification sur les roches intactes (non fracturées) qui se base sur l'influence combinée de la résistance à la compression simple et du module tangent à 50% de la contrainte de rupture. Cette classification n'est, à notre connaissance, que peu usitée. Ramamurthy [2004] propose une nouvelle classification des massifs rocheux, dont le principe repose sur celle de Deere et Miller mais en y incluant des considérations sur les joints. Il l'appelle « geo-engineering classification » de façon à montrer sa volonté de prendre en compte l'état géologique de la roche. Ainsi, il se base sur la connaissance des résistance, module, indice de dégradation et lithologie de la roche.

Citons enfin le travail considérable mené en Chine dans le cadre du chantier du barrage des Trois Gorges qui a permis d'avancer significativement dans le domaine de la mécanique des roches, compte-tenu de la taille de l'ouvrage. Ainsi [Wang *et al.*, 2004], proposent un nouveau concept de classification se basant sur les roches étudiées dans le cadre de ce projet, en utilisant la méthode MST (metha- synthesis theory) qui prône la combinaison de 3 sources d'informations : l'estimation empirique, les analyses théoriques et les mesures réalisées. Ce type de système est donc remis à jour en permanence en fonction de ce qui est observé.

4.1.2. Modèle structural : prise en compte de la répartition statistique des fractures

Nous englobons sous ce vocable l'ensemble du travail consistant en la représentation (en trois dimensions) du massif fracturé, permettant de reproduire la géométrie et l'agencement dans l'espace des différents types de roche rencontrés, ainsi que le réseau de fractures. Le principe général de ce type de modélisation réside dans la création d'un bloc qui est ensuite découpé en autant de plans de fracture que nécessaire. Les caractéristiques géométriques données aux fractures (forme, espacement, longueur, loi de répartition) dépendent souvent plus du choix du modélisateur que des observations de terrain, qui gèrent, elles, les orientations. Cette partie présente les éléments à prendre en compte pour une modélisation raisonnée du massif fracturé.

Traitement des familles de fractures

A l'issue des relevés sur le terrain (cf 2.1), deux modes de traitement des données co-existent pour obtenir les familles de fractures : le traitement par projection stéréographique (canevas de Wülf) ou équilatérale (canevas de Schmidt) et le traitement statistique : utilisation de lois statistiques pour représenter les distributions des orientations et des espacements.

Le traitement par projection est une méthode de représentation graphique des discontinuités, qui est de loin la plus utilisée. Le principe consiste à représenter chaque plan de faille défini en trois dimensions sur un canevas circulaire. Ceci permet, d'une part, de synthétiser les résultats sur le canevas et d'autre part, grâce à l'expérience du géologue, de définir les différentes familles de discontinuités et de les corréliser entre elles.

Il existe deux techniques couramment utilisées :

1. la projection stéréographique qui conserve les angles et qui permet donc d'étudier simplement les relations entre discontinuités ; on utilise alors des canevas de Wülf ;
2. la projection équilatérale, qui conserve les surfaces et qui permet donc de mesurer les distributions spatiales ; on utilise alors des canevas de Schmidt.

On définit alors les pôles des plans. Un pôle est défini comme étant le point représentant l'intersection de la normale du plan considéré avec l'hémisphère inférieur ou supérieur de la sphère de référence. Chaque plan est alors représenté sur les canevas par la projection de son pôle. Ainsi, l'orientation d'un plan est représenté par un point. On rappellera que l'AFTES recommande l'utilisation de projections sur l'hémisphère supérieur.

Le traitement statistique des données est une étape importante dès que l'on s'intéresse à la modélisation de la fracturation en mécanique des roches. On ne reviendra pas dans le détail sur l'ensemble des lois utilisables et utilisées, le lecteur intéressé voudra bien se reporter à des manuels de statistiques, en particulier [Kabbaj & Baroudi, 1995], [Marcotte, 2000] et [Upton & Fingleton, 1989]. Je rappellerai juste les points principaux :

1. *La dispersion angulaire des discontinuités* : il est en général nécessaire, préalablement à tout traitement statistique, de vérifier les coordonnées utilisées et éventuellement d'effectuer les changements de coordonnées nécessaires. En particulier, suivant d'où proviennent les données, il faut vérifier les conventions : notation française (azimut, direction, pendage), notation américaine (direction du pendage « dip direction » et pendage « dip ») ou bien utilisation des coordonnées cartésiennes ou sphériques des normales au plan de faille dans ce cas on utilise plutôt une loi de distribution de

Langevin-Fisher ou bien (mais plus rare) une loi de Bingham ou des lois normales en azimut et pendage ;

2. *La modélisation statistique des espacements entre discontinuités* : un problème important pour le traitement statistique des données, reste bien la représentativité de l'échantillonnage effectué, celui-ci étant naturellement biaisé, d'une part par l'orientation des affleurements et/ou des forages où sont réalisés les relevés comme nous l'avons vu en 2.1, et d'autre part par la sensibilité du géologue qui effectue ces relevés. Il est donc nécessaire de faire des relevés aussi exhaustifs que possible. A nouveau, il existe plusieurs lois de distributions statistiques utilisées pour prendre en compte les écartements interstructuraux. : on utilise préférentiellement les lois de Poisson, exponentielle, normale ou de Weibull.
3. *Les tests pour la confirmation des hypothèses statistiques*. Différents tests d'ajustement existent dans la littérature. Citons par exemple les tests simples qui permettent à l'utilisateur de voir si l'ajustement qu'il a choisi peut convenir ou non. Des techniques dérivées des moindres carrés, de la loi normale ou de la loi de Poisson existent, mais les deux tests les plus utilisés sont les tests du Chi-deux et de Kolmogorov.

4.1.3. Modèle géomécanique : milieux discontinus Resoblok

Resoblok ([Heliot, 1988] ; [Asof, 1991] [Baroudi *et al.*, 1992] ; [Korini *et al.*, 1995], [Merrien-Soukatchoff *et al.*, soumis]) est développé au LAEGO, laboratoire commun à l'Ecole des Mines de Nancy (ENSMN), l'École de Géologie (ENSG) et l'INERIS. Il s'appuie sur le principe de l'identification des blocs-clés par la méthode déterministe [Goodman et Shi, 1985] et sur l'algorithme de stabilité de Warburton [Warburton, 1981].

Il est important de noter que Resoblok n'est pas commercialisé, et son utilisation est le fruit d'un accord de collaboration passé avec le LAEGO. D'un point de vue conceptuel, l'architecture de Resoblok est organisée de la manière suivante :

- Un module de modélisation géométrique du massif sous forme d'assemblages de blocs. L'introduction des fractures peut être réalisée de façon déterministe ou statistique ; dans ce cas, chaque famille est définie par une loi statistique caractérisant l'orientation et une autre caractérisant l'espacement.
- L'extension des fractures est prise en compte soit en arrêtant celles-ci les unes sur les autres (prise en compte de l'histoire géologique supposée), soit en admettant des fractures polygonales. L'assemblage des blocs est généré sous forme d'un fichier base de donnée par l'intermédiaire d'un module noté **bg**. Ce module utilise différentes séries de nombres pseudo-aléatoires pour générer des assemblages de blocs différents à partir un même fichier scénario. Le numéro de simulation est le paramètre permettant le repérage de chaque série particulière de nombres pseudos aléatoires.
- Différents modules « avals » permettent d'étudier l'assemblage de blocs ainsi créé : le module **bd**, qui permet de représenter les blocs graphiquement ; le module **bh** qui permet de représenter les histogrammes des volumes des blocs sélectionnés, ainsi que les surfaces des faces correspondantes, et enfin le module **bsa** qui permet l'analyse de stabilité des blocs isolés (blocs stables, chute libre, glissements plans, glissements dièdres).

Resoblok utilise un langage informatique spécifique, appelé BGL (Block Generation Langage), qui permet d'écrire un scénario, qui sera ensuite interprété pour générer

l'assemblage de blocs. L'analyse de stabilité permet une approche globale du massif (type de mouvements de blocs, volumes déplacés, blocométrie, etc...).

Resoblok a été utilisé, entre autres, dans l'étude des déblais d'Ax-les-Thermes. En effet, une proposition de dimensionnement du soutènement innovante avait été réalisée en 1999. Elle utilisait les méthodes classiques d'analyses de stabilité à l'aide de stéréogramme auxquelles ont été ajoutées des considérations portant sur l'existence de ponts rocheux permettant d'alléger le schéma de boulonnage issu de l'application de la norme XP-P 94-240, seule norme existant dans le domaine. Cette approche semi-empirique a pu être validée statistiquement par l'utilisation de Resoblok [Ar8 et Ac14] et Figure 38. De plus, un résultat tout à fait intéressant de l'étude porte sur le mode de rupture du massif : l'analyse sur stéréogramme donnait en effet le glissement plan comme mode de rupture le plus préjudiciable, or, l'analyse menée avec Resoblok montre que même si ce mode de rupture existe, son occurrence est extrêmement faible et ce sont les glissements de dièdres qui sont dimensionnants.

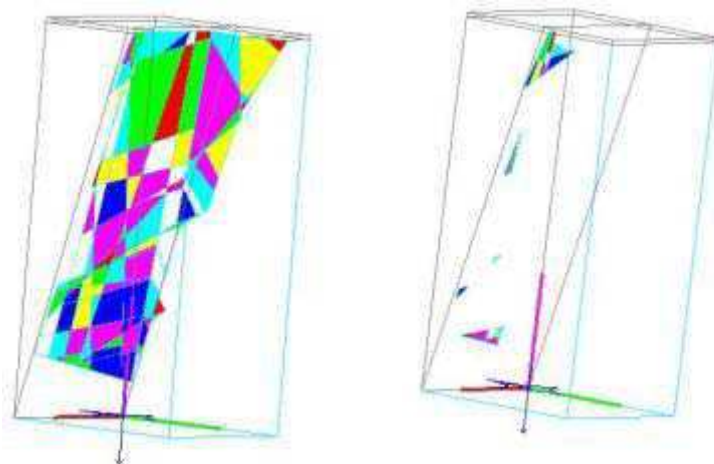


Figure 38. Exemple de calculs Resoblok [Ar8]

Comparaison des volumes de blocs instables obtenus avec et sans soutènement – conditions d'un des déblais d'Ax-les-Thermes – les couleurs permettent la visualisation des blocs, elles n'ont pas de signification physique

Dans [Ac15], nous nous sommes basés sur les mêmes données réelles de terrain issues du site d'Ax-les-Thermes, mais en axant l'étude sur les caractéristiques limites (taille du modèle, conditions aux limites, etc..) à prendre en compte pour réaliser une caractérisation géomécanique réaliste des conditions du terrain. Ce travail a été réalisé afin de mieux maîtriser les paramètres de calcul nécessaires à une meilleure prise en compte des observations de terrain. Dans [Ar7] nous avons approfondi l'importance de la bonne représentation des données géométriques pour la modélisation mécanique (dans un cadre plus large que celui uniquement de Resoblok). Enfin, dans [Ac9] nous avons abordé, entre autres, l'importance des valeurs de cohésion à prendre en compte (Figure 39) pour vérifier la stabilité des blocs. En effet, Resoblok ne crée des plans de fractures que de deux sortes : qui traversent le modèle de part en part ou bien qui s'arrêtent sur une autre famille de fractures. Il n'est pas destiné à rendre compte de l'existence de ponts rocheux, ainsi, l'ensemble des fractures créées sont supposées ouvertes, et il faut jouer sur les valeurs de cohésion du matériau et éventuellement d'angle de frottement pour essayer de mieux reproduire la réalité.

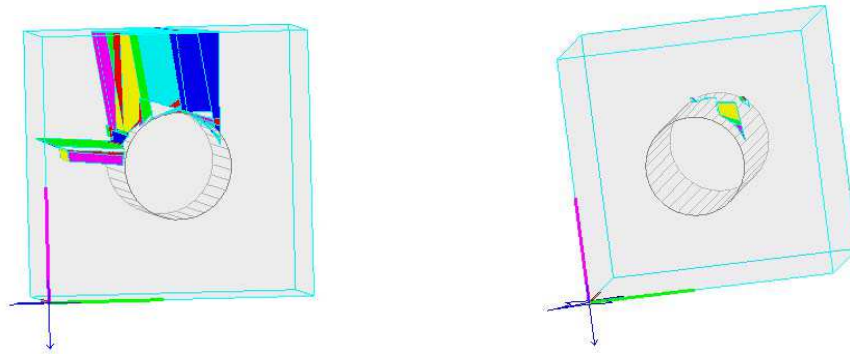


Figure 39. Exemple de calculs Resoblok [Ac9]

Comparaison des volumes de blocs instables obtenus en tenant compte d'une cohésion de 0 ou de 20 kPa – conditions géométriques du tunnel de St Béat - les couleurs permettent la visualisation des blocs, elles n'ont pas de signification physique

4.1.4. Modèle géomécanique : milieux discontinus Udec

UDEC repose sur la méthode des éléments distincts, qui a été mise au point par Cundall [Cundall, 1971, 1980], [Cundall et Hart, 1985], [Starfield & Cundall, 1988] afin de prendre en compte le comportement discontinu des massifs, c'est-à-dire, à la fois les mouvements des blocs les uns par rapport aux autres (grands déplacements au niveau des failles, ...), mais également les chutes de blocs. La méthode se distingue par trois caractéristiques fondamentales :

1. le massif rocheux fracturé est représenté sous la forme d'un milieu discontinu, constitué par un assemblage de blocs qui interagissent par contact de leurs angles et de leurs côtés ;
2. les discontinuités sont considérées comme des interactions entre blocs ; leur comportement est régi par des lois liant forces et déplacements au niveau des contacts entre blocs ;
3. le temps intervient de manière explicite dans la résolution des équations du mouvement ; on peut ainsi simuler des comportements non linéaires de la roche et des discontinuités et traiter des problèmes dynamiques (séismes, explosions).

UDEC et sa version en trois-dimensions 3DEC, commencent à être relativement développés, bien qu'ils soient encore surtout utilisés dans le domaine de la recherche : [Su, 2004], utilise le code pour essayer de mieux appréhender l'effet des systèmes de fractures (et de leurs intersections) sur les contraintes in-situ, et a appliqué son calcul sur le cas du laboratoire souterrain d'Äspö (Suède). [Bedjaoui et al., 2004] ont proposé une étude générale traitant du problème de la stabilité des massifs rocheux en fonction des caractéristiques des terrains rencontrés (orientation et angle de frottement).

La description des fractures se fait selon Udec grâce à la description de quatre paramètres dont on donne la moyenne et l'écart type. Ces paramètres sont rappelés ci-dessous :

- l'angle (α) que fait la trace de la fracture sur le plan considéré avec l'horizontale ;
- la persistance (t), dans le plan de coupe ;
- un paramètre (g) définissant l'écartement entre deux traces successives de la même famille selon la même génératrice ; ce paramètre n'est typiquement pas mesuré lors des relevés systématiques de terrain puisqu'on ne prend en compte que les fractures (re)couplant l'horizontale ou la verticale ;
- l'espacement (s) dans le plan de coupe.

Pour la réalisation d'une coupe 2D, l'un des principaux problèmes réside donc dans la transformation des valeurs mesurées sur le terrain, selon une certaine surface, pas nécessairement plane, qui correspond en général à un affleurement disponible, en des valeurs utilisables par le code de calcul. La Figure 40 tirée de [Ac11] illustre ce travail : elle présente l'influence de différents modèles de joints (Mohr-Coulomb, Mohr Coulomb avec radoucissement, et « Continuous Yielding ») sur les iso-valeurs des déplacements dans le massif fracturé étudié (fondations du Viaduc sur le Viaur).

Après différentes tentatives, j'ai fait le choix de systématiquement coupler les calculs Udec avec Resoblok. En effet, ce dernier montre la possibilité d'extraire des coupes 2D selon le plan souhaité. Ces coupes peuvent alors servir de modèle géométrique pour les calculs mécaniques proposés par Udec. La Figure 41 montre un exemple de modèle de terrain réalisé avec Resoblok, dont des coupes ont ensuite été extraites pour rendre compte du système de fractures en place sous les fondations du Viaduc sur le Viaur.

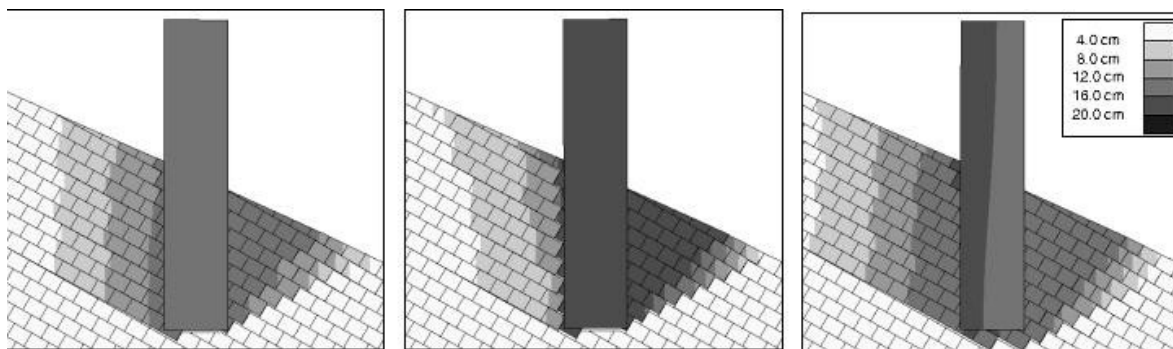


Figure 40. Iso-valeurs des déplacements verticaux autour de la pile du viaduc sur le Viaur pour un effort de traction de 63 MPa, calculs UDEC [Ac11]

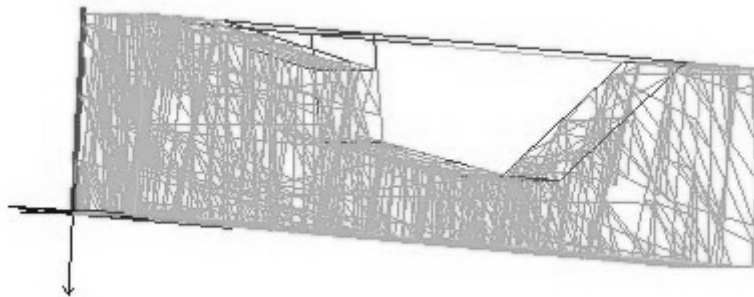


Figure 41. Exemple de modèle de terrain réalisé avec Resoblok (vallée du Viaur)

Ce couplage entre Resoblok et Udec est également d'actualité pour des études en cours de développement et en collaboration avec Pietro Alfonsi (LCPC) sur l'analyse de l'ouverture des joints. Nous travaillons à modéliser l'ouverture de joints consécutivement au creusement d'un tunnel, en s'appuyant sur le cas réel de St Béat (résultats non publiés à ce jour, la Figure 42 est une des coupes Udec, tirée de Resoblok sur laquelle nous travaillons actuellement).

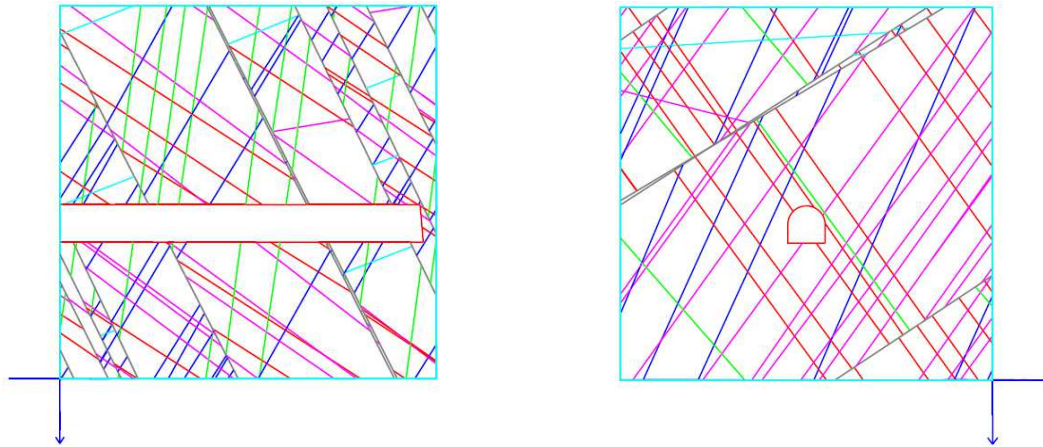


Figure 42. Coupes Udec (longitudinale et axiale) du massif de St Béat, réalisées à partir de simulations Resoblok

Chaque couleur (attribuée manuellement) correspond à une famille de fracture

4.1.5. Modèle géomécanique : milieux discontinus LMGC

Une collaboration avec l'école des Mines d'Alès nous a permis de nous investir dans l'utilisation de LMGC90. C'est un code de calcul entièrement libre, développé par le laboratoire homonyme de l'université de Montpellier. Il est basé sur la méthode des éléments discrets (DEM). On y distingue les méthodes dites « smooth », utilisant des lois d'interactions régulières (fonctions continues et différentiables) entre les éléments et qui s'accompagnent d'un schéma numérique explicite (type Udec) et les méthodes « non smooth », qui, à l'opposé, utilisent des lois d'interaction non régulières (lois à seuil, sauts de vitesse, ...) et nécessitent de traiter l'équation de la dynamique de façon implicite. LMGC90 fait partie de ces dernières. La méthode NSCD (Non-Smooth Contact Dynamics) initiée et développée par J.J. Moreau [1988, 2003] et M. Jean [1992, 2001], est dédiée à la résolution de problèmes relatifs aux systèmes dynamiques en présence de contraintes unilatérales. Dernièrement, lors du travail de thèse de Ali Rafiee, sous la direction de Marc Vinches, une interface avec Autocad a été développée pour une prise en compte des données des massifs rocheux [Raffie 2008].

Dans le cadre du travail de thèse d'Ali Rafiee, nous avons collaboré à la modélisation des talus du Pallat [Raffie et al, 2009], comme sur l'exemple de la Figure 43.

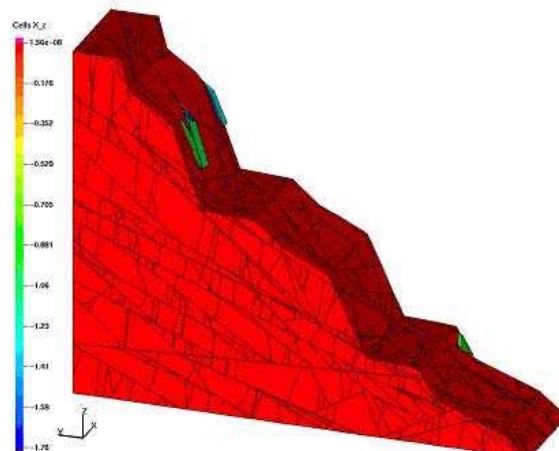


Figure 43. Modélisation des talus du Pallat réalisée à l'aide de LMGC90 [Rafiee et al. 2009]

Cette collaboration est en plein développement puisque je participe à l'encadrement de la thèse de Mme Tran (inscrite à l'Université de Montpellier, directeur de thèse, Marc Vinches) dont le sujet principal sera la modélisation à l'aide de LMGC90 du tunnel de St Béat, afin de développer des applications propres à la mécanique des roches. Ce travail de recherche vient de démarrer à la mi-mars. Nous avons déjà effectué une visite sur le site, et la réalisation d'essais mécaniques au laboratoire ainsi que le suivi d'une campagne de sur-carottage *in situ* sont prévus pour l'été 2011. Les données supplémentaires ainsi récoltées devraient permettre, entre autre, de caler les conditions aux limites du modèle qui, de par l'historique de la formation de la chaîne pyrénéenne, sont très délicates à appréhender.

Enfin, l'intérêt de LMGC est de pouvoir étudier la dynamique dans les structures. Nous envisageons donc de regarder, grâce à ce code de calcul l'influence d'un séisme réel sur la stabilité d'un massif rocheux, la sismicité des Pyrénées étant un paramètre important à prendre en compte lors du dimensionnement des ouvrages (aléa modéré à moyen suivant les zones, d'après la nouvelle carte d'aléa séisme datant de 2005, la carte « risque » correspondante venant juste d'être publiée en novembre 2010). Se pose alors, entre autres, la question de la loi de comportement à utiliser pour modéliser le contact entre les blocs qui pourraient être affectés par le séisme.

4.1.6. Modèle géomécanique : milieux continus équivalents CESAR-LCPC

L'approche de type milieux continus consiste à intégrer le comportement des fractures dans la loi de comportement globale du massif. En mécanique, les différentes techniques existantes font en général appel aux méthodes d'homogénéisation [de Buhan & Maghous, 1997], [Bekaert & Maghous, 1996] ou utilisent une formulation empirique de la loi de comportement. Ces deux approches se prêtent néanmoins mal à la prise en compte du comportement non linéaire des joints. De plus, en homogénéisation, il est délicat de prendre en compte l'intersection de fractures qui peuvent créer l'existence d'un bloc isolé. Historiquement, on peut citer les travaux de [Budiansky & O'Connell, 1976], qui ont appliqué la méthode auto-cohérente aux milieux fissurés, [Cai et Horii, 1992 ; 1993], qui ont proposé une méthode d'homogénéisation qui prend en compte une loi de comportement des joints anélastiques.

La difficulté pour l'utilisation de ces méthodes revient à trouver le « bon » VER : Volume Représentatif Equivalent. [Coste, 1997] propose l'assimilation du milieu fracturé à un milieu poreux équivalent, grâce à l'utilisation d'un VER hydraulique, différent du VER mécanique. [Pouya & Ghoreychi, 2001] utilisent également le concept de VER et la notion d'homogénéisation mécanique pour l'appliquer à l'évaluation de la résistance mécanique des massifs fracturés. Trouver les lois de comportement à utiliser pour assimiler les milieux continus à des milieux discontinus permet ensuite l'utilisation de logiciels utilisant la mécanique des milieux continus pour simuler le problème recherché.

Enfin, l'implémentation, dans CESAR-LCPC, (développé par le LCPC, et basé sur la méthode des éléments finis,) des éléments de joints devrait permettre d'aboutir à un outil permettant la modélisation des milieux fracturés avec un comportement élastoplastique pour les joints. Le massif est alors découpé par quelques fractures clairement identifiées et au sein des grands ensembles ainsi créés, le milieu est considéré continu [Bost, 2007], [Benami, 2009]...

Une comparaison des méthodes continues et discontinues a été abordée en [Ac11], avec une comparaison des déplacements obtenus sur des fondations au rocher réalisées sur une

penne. Ce travail a également été fait en se basant sur le cas de la création des déblais d'Ax-les-thermes (rapport interne 16-75-09-2006/16-009/01). La Figure 44 compare les contraintes de cisaillement obtenues dans le massif avec un modèle 2D issu d'un calcul César et avec un modèle 2D issu d'un calcul UDEC.

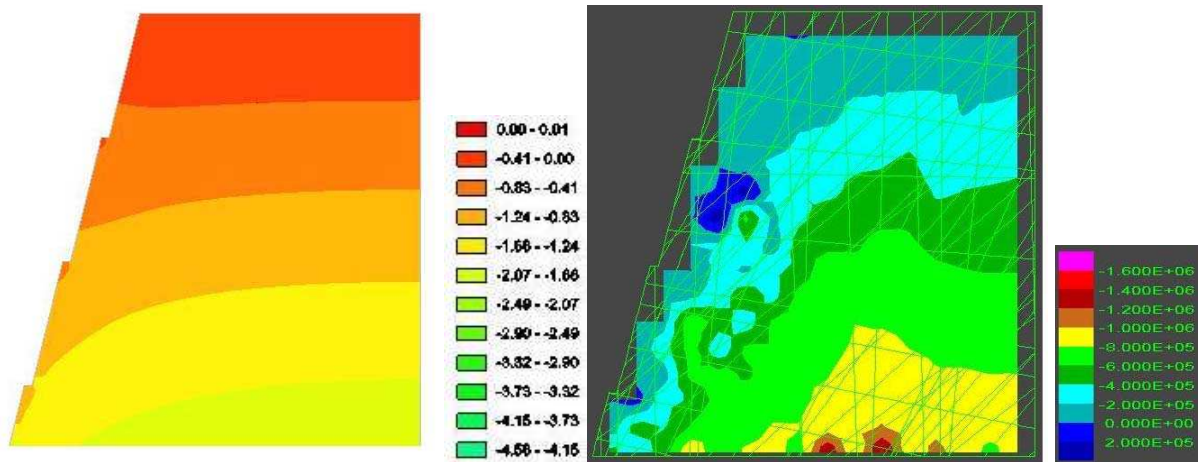


Figure 44 : Comparaison milieu continu équivalent / milieu discontinu – représentation de la contrainte de cisaillement au niveau d'un des déblais d'Ax-les-thermes

Les conditions aux limites considérées sont les mêmes, le seul chargement mécanique appliqué provient de la gravité. Ce calcul très simple permet facilement d'observer que la prise en compte de la fracturation influe sur le comportement mécanique du massif.

Le travail va se poursuivre en ce sens. Le stage de mastère 2 (Ingrid Munoz) qui s'est déroulé cet été a porté sur la prise en compte de la topographie réelle sur la répartition des contraintes dans le massif de St Bât (Figure 45). Compte tenu de la complexité et de la taille du modèle, seuls les calculs de stabilité ont été réalisés et le creusement du tunnel n'a pu être modélisé. Le travail demande donc à être poursuivi en utilisant les résultats de ce premier calcul comme conditions aux limites pour les calculs 2D Udec, et comparés aux modèles obtenus avec LMGC90 (thèse de Mme H Tran, en cours à l'école des Mines d'Alès / université de Montpellier).

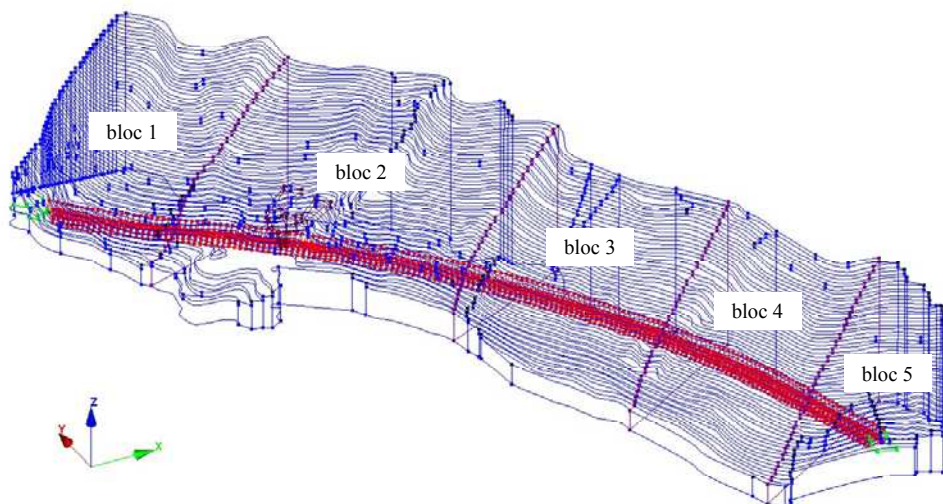


Figure 45 : Prise en compte de la topographie du site de St Bât

4.1.7. Conclusion sur les modèles

Il existe trois voix complémentaires d'utilisation des modèles numériques : l'utilisation de modèles pour identifier et/ou hiérarchiser des phénomènes pouvant être mis en jeu lors de modifications du massif rocheux, à une échelle plus fine, vérifier les lois de comportement proposées en validant le modèle par des résultats expérimentaux, et aider au dimensionnement de l'instrumentation à mettre en place.

Depuis une vingtaine d'année de nombreux moyens de calculs se développent et co-existent. Il est important de choisir le moyen le plus adapté au cas étudié. Le choix doit se faire en fonction des caractéristiques du site étudié (sol / roche, peu/ très fracturé, présence ou non d'eau, etc...) mais également des moyens financiers et humains à notre disposition. Pour cela, j'ai à ma disposition au différents outils qui ont été présentés préalablement (Resoblok, UDEC, LMGC90, CESAR-LCPC). J'ai eu l'occasion de travailler sur chacun et tous ont des avantages et des inconvénients (Tableau 6). Une des pistes à suivre (et développée dans les « perspectives ») est le couplage de certains de ces codes, comme cela est déjà possible (et prometteur) entre Resoblok et UDEC.

Tableau 6 : avantage et inconvénients des modèles

	Descriptif succinct	avantages	inconvénients
Classification	Méthodes semi empiriques	Simple méthodes universelles	Simpliste Dire d'expert
Resoblok	Méthode par blocs Calcul statistique	Simple d'utilisation Prise en compte du soutènement	uniquement calculs de stabilité beaucoup de simulations nécessaires
UDEC	Milieus discontinus	Relativement simple	2D, quelquefois opaque
LMGC90	Milieus discontinus	3D sources disponibles calculs dynamiques	Complexe Peu convial
CESAR-LCPC	Milieus continus	Logiciel « maison »	Fracture prises en compte de façon déterministe ou implicite

4.2. Instrumentation des ouvrages

La connaissance réelle de la réponse du massif à une sollicitation naturelle ou anthropique est une des clefs de voûte de notre travail. En effet, de nombreuses hypothèses peuvent être proposées en laboratoire, avec des logiciels, des lois de comportement ou des expérimentations très sophistiquées, si elles ne sont pas comparées concrètement à des mesures de terrain, elles restent hypothétiques. Ces enregistrements sur le terrain sont néanmoins souvent très difficiles à obtenir, souvent à cause des coûts engendrés.

L'instrumentation *in situ* d'ouvrages au rocher peut être relativement différente de ce qui se fait dans les sols. De par la structure discontinue du massif, les déplacements sont en général relativement faibles (sauf en cas d'instabilité marquée) et localisées à des endroits critiques (souvent les discontinuités). L'instrumentation choisie doit être adaptée à la géologie

et la morphologie du site, aux enjeux rencontrés et mise en regard avec les moyens financiers disponibles. Les mêmes propositions ne seront évidemment pas faites s'il s'agit d'une instabilité de falaise marquée ou bien si l'on se place dans un site « laboratoire » destiné à mieux comprendre les phénomènes étudiés.

J'ai été ainsi confrontée à ces différents cas : sur des sollicitations opérationnelles j'ai participé aux choix d'instrumentation à mettre en place sur des instabilités avérées. Dans le cas des mouvements de versants au niveau du Pallat (RN116, voir précision sur le site en annexe), par exemple, il a été procédé à la mise en place et au suivi d'une quarantaine de cibles disposées sur l'ensemble de la zone (Figure 46). Les cibles sont des prismes optiques placés sur des barres d'acier de 28 mm foncées dans les sols de surface ou scellées dans la roche sur une hauteur de 1,50 m. Ces cibles sont suivies par un tachéomètre de précision pour obtenir une précision infra-centimétrique dans les 3 directions de l'espace.

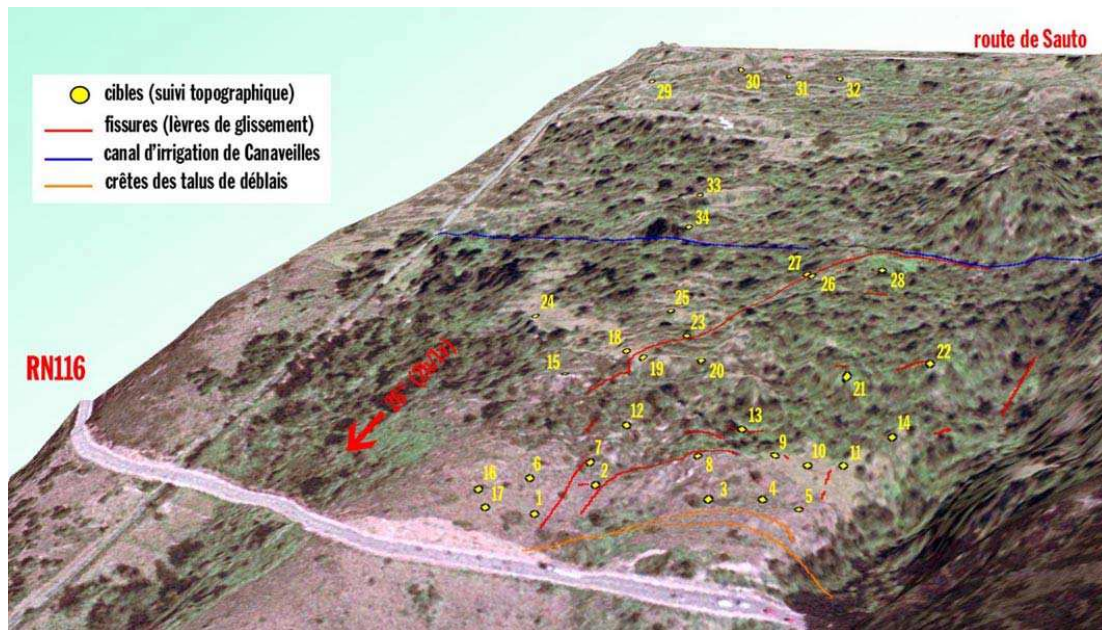


Figure 46 : Implantations GPS des désordres et des cibles sur le MNT du versant

D'un point de vue « connaissance du comportement du massif », plusieurs pistes ont également été explorées : en 2006 puis 2007 j'ai été à l'instigation de la réponse à deux appels à projet de l'ANR. Le but de la recherche envisagée était de profiter du chantier d'Ax-les-Thermes, où plusieurs talus de plus de 600 m de long et jusqu'à 48m de haut allaient être creusés. Nous souhaitons ainsi développer notre connaissance selon quatre axes :

1. *Acquisition et traitement des informations géométriques sur le site* : la connaissance du terrain consécutive à l'étude de tracé devait être complétée par une approche beaucoup plus exhaustive du site permettant de collecter des informations en trois dimensions du massif d'étude. Différents niveaux de complexité du massif devaient être pris en compte comme « données d'entrées » aux modèles numériques et comme indicateurs de l'état du talus.
2. *Caractérisation mécanique du massif rocheux* : différents essais de laboratoire allant de la simple reconnaissance mécanique classique (compression simple) à une caractérisation beaucoup plus fine (mise au point d'une loi de comportement des discontinuités rocheuses en rapport avec leur rugosité) est envisagée. Cette partie devait être complétée par le recueil et l'analyse des mesures *in-situ*.
3. *Modélisation numérique du massif* : elle devait comporter une étape de modélisation géométrique à l'aide de différents géomodeleurs et une étape de modélisation

mécanique à différents niveaux, du plus simple (dimensionnement du soutènement suivant les différentes recommandations classiquement utilisées au plus complexe (analyse dynamique en milieu discret) en passant par l'étude de la comparaison de modèles 2D et 3D en milieux continus ou discontinus.

4. *Suivi de chantier en vue d'identifier de façon systématique et permanente les facteurs de risque source de danger immédiat ou lointain* : la méthode « observationnelle » est au cœur de notre démarche, nous l'associons systématiquement aux avis d'experts que nous essayons d'étayer par l'obtention de données quantifiables. Une base de données géoréférencées était prévue.

Les projets comprenaient plusieurs partenaires universitaires et du monde de l'entreprise. J'en ai assuré la coordination et le portage. Des modèles numériques ont été réalisés en vue du pré dimensionnement de l'instrumentation (rapport de recherche n°16-75-009-2006 / 16-009 / 01). Malheureusement ces projets n'ont pas été retenus, et compte tenu des impératifs de chantier, nous avons fait le choix de ne pas les représenter en 2008.

En suivant une idée similaire, c'est à dire profiter d'un grand chantier pour parfaire notre connaissance du massif rocheux, je suis en train de monter un projet de recherche avec l'Inéris et la DREAL Midi-Pyrénées. Le but du travail engagé est de suivre le creusement du tunnel de St Béat, en milieu rocheux et fracturé, par une méthode de surveillance géophysique innovante basée sur le traitement du bruit sismique et connue sous la dénomination d'« interférométrie du champ diffus ». Ce projet est actuellement encore en cours de discussion pour les aspects liés au financement des forages nécessaires à la mise en place des capteurs. Je le détaille plus longuement dans les perspectives (6).

Enfin, dans le cadre de l'opération de recherche « Maîtrise des risques de mouvements de terrain en zone urbaine ou sensible » j'ai initié un travail de recensement des zones rocheuses « actives » pour comparer les modes de suivi de ces zones tels qu'ils sont actuellement pratiqués dans le réseau des Laboratoires Régionaux. Je réalise ce travail afin de sensibiliser les acteurs du réseau aux particularités liées aux mouvements rocheux et d'essayer d'uniformiser si possible les pratiques. Cet aspect est un travail à moyen voire long terme, mais il est important de ne pas perdre la connaissance acquise lors du renouvellement des générations, voire lors du changement des compétences provoquées par la réforme de l'état.

5. Conclusion

J'ai essayé, au travers de ce document de mettre en avant une démarche pouvant être suivie face à des sites identifiés comme instables ou bien qui vont être soumis à des modifications (anthropiques, le plus souvent) qui peuvent conduire, même de façon transitoire, à des instabilités. Pour comprendre et tenter de prévoir ces instabilités, il faut tout d'abord caractériser le site de façon adéquate, puis envisager des protocoles d'essais (en laboratoire ou *in situ*) pour identifier les phénomènes prépondérants. Enfin il reste à mettre en œuvre les modèles qui semblent les plus adéquats eu égard aux problèmes rencontrés.

La caractérisation du site passe forcément par une phase de reconnaissance sur le terrain, puis une phase d'acquisition de données par les méthodes adéquates et adaptées au site. Nous avons largement illustré cet aspect dans la partie 4.1, en nous appuyant sur les méthodes existantes et quand cela était possible, en estimant pour partie les biais induits par leur utilisation. Ainsi, le but recherché est bien de faire le lien entre l'ingénierie et la recherche, en améliorant les méthodes de travail aux vues des avancées scientifiques proposées.

La recherche des paramètres caractéristiques au laboratoire procède de la même idée générale : maîtriser les moyens d'essais et parvenir à obtenir des grandeurs utiles à la compréhension des phénomènes se produisant dans le massif étudié, quitte pour cela à réaliser des trajets de chargement « originaux ». Une meilleure connaissance du comportement de la roche au laboratoire, conjuguée à une bonne prise en compte des facteurs d'échelle doit conduire à affiner l'identification des paramètres nécessaire à la modélisation du massif.

Enfin, il s'agit de trouver et d'utiliser le modèle le mieux adapté au cas considéré, en fonction de sa géométrie, des conditions du milieu et des phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence.

6. Perspectives

Depuis mon arrivée au LRPC de Toulouse en septembre 2003, différents chantiers ont été ouverts et ont pu progresser. Je ne conçois mon travail qu'en évolution constante. Ainsi, il reste encore beaucoup de chemin à parcourir. Différentes pistes sont envisagées à court ou moyen terme. Je vais développer mes propositions actuelles en reprenant le plan suivi pour l'exposé de mes travaux, et en laissant un dernier paragraphe qui concernera les évolutions plus tournées vers le long terme qui vont dans le sens des objectifs en développement au LRPC.

6.1. Description du massif rocheux

Dans la continuité de ce qui a été réalisé dans le cadre de la convention avec le CETU et le CNAM sur l'analyse des biais induits par les méthodes de reconnaissance de la fracturation, une thèse est en cours de montage, qui pourrait s'intituler « Apports combinés de l'analyse géologique, d'expérimentations *in situ* et de la modélisation par modèles discrets à l'étude du creusement d'un tunnel en milieu rocheux fracturé : application au site de Saint-Béat, Hautes-Pyrénées ». La doctorante sera présente en permanence sur le site du chantier et devra, en particulier, réaliser les relevés de terrain et leur analyse au cours du creusement. Elle s'appuiera sur son suivi quotidien pour poursuivre l'analyse précise de la fracturation du site et améliorer les corrections de biais à mettre en œuvre.

Je suis à l'instigation de ce projet. L'accord de principe de la Dréal Midi-Pyrénées (maître d'ouvrage du tunnel, et financeur du projet) a été acquis ainsi que l'inscription à l'Université de Montpellier. La thèse devrait débiter au 1^{er} novembre 2010.

Des contacts très récents ont également été pris avec le Cémagref de Grenoble pour étudier la possibilité de projets de recherche communs. Deux pistes ont été abordées mais demandent à être approfondies :

1. la prise en compte des ancrages dans le clouage du milieu rocheux : le dimensionnement du soutènement par clouage à mettre en œuvre se fait encore de façon trop arbitraire et mériterait une meilleure connaissance de la mécanique fine et de l'endommagement des clous au cours du temps ;
2. l'analyse des éléments déclencheurs des instabilités rocheuses en terme de loi de comportement à intégrer dans un code de calcul adéquat : les codes de calculs actuels permettent de prévoir si un assemblage de bloc est stable ou instable ; peu d'entre eux permettent de prendre en compte un endommagement des joints qui, d'une situation stable, peut conduire à une instabilité ; un premier travail serait donc d'identifier des lois de comportement.

6.2. Caractérisation en laboratoire

La poursuite de mes travaux de recherche en laboratoire devrait se faire selon deux axes :

1. sur l'étude de l'endommagement de la matrice rocheuse : un travail important reste à accomplir, comme nous l'avons vu, sur l'analyse de l'endommagement à partir des fréquences propres et des énergies. De nombreux enregistrements de signaux des ondes élastiques sous différentes sollicitations (uniaxiale, triaxiale, gel/dégel) ont été réalisés ; il reste encore à appliquer cette technique de façon plus systématique afin de vérifier si des variations des fréquences caractéristiques ou des énergies sont observables en fonction du niveau d'endommagement : en effet si on arrive à trouver des évolutions de ces caractéristiques au cours de l'endommagement, il sera peut-être possible d'extrapoler à des enregistrements sur le terrain pour caractériser in-situ l'état de fracturation du massif, autrement que par la géophysique classique ;
2. sur le comportement au cisaillement des discontinuités : la poursuite de la collaboration avec le GHYMAC me semble en effet très prometteuse, en conjuguant nos moyens expérimentaux et nos connaissances du terrain. Les résultats déjà obtenus lors du travail de thèse de Melle Hoang méritent d'être approfondies, le lien particulier entre morphologie et comportement mécanique des discontinuités étant particulièrement intéressant et à la jonction de plusieurs disciplines : étude du comportement des fondations au rocher, géothermie, forage pétrolier, etc. Une réflexion est actuellement en cours pour continuer ce travail dans le cadre des études portant sur la sécurité du stockage du CO₂ : il s'agirait d'étudier l'évolution de la morphologie et du comportement mécanique de répliques de fractures endommagées artificiellement (endommagement chimique, thermique, etc.). Ce travail ne pourra ce faire qu'en lien avec le GHYMAC.

6.3. Comportement des ouvrages

6.3.1. Modélisation géomécanique

Comme nous l'avons déjà écrit, le couplage entre Resoblok, pour la génération des familles de fracture, et Udec, pour le calcul mécanique nous semble relativement prometteur, en particulier pour identifier des phénomènes et obtenir des ordres de grandeur des phénomènes réellement observés. Néanmoins, UDEC est, de par sa structure 2D, limité : en effet, les mouvements de blocs pris en compte ne peuvent être que des glissements plans, ou éventuellement, des rotations sur un axe perpendiculaire au plan de coupe, ce qui limite son champ d'application, dans le cas de l'étude d'instabilités rocheuses. Il n'est pas prévu, à l'heure actuelle, d'investir dans la version 3D, TriDec.

L'existence de LMGC90 en libre accès et développé par le laboratoire éponyme de l'université de Montpellier et son application aux massifs rocheux semble également très intéressante. Deux pistes sont actuellement suivies : dans le cadre de la thèse de Mme Tran (directeur de thèse, Marc Vinches) dont l'item principal sera la modélisation à l'aide de LMGC90 du tunnel de St Béat, afin de développer des applications propres à la mécanique des roches et dont le travail de recherche vient de démarrer à la mi-mars ; l'implantation de

lois de contact pouvant rendre compte du comportement du joint rocheux lors de son altération pourrait être envisagée dans ce cadre. Un des principaux inconvénients de LMGC90 est qu'il ne possède pas de pré processeur facile d'utilisation et applicable simplement à la mécanique des roches. La représentation initiale du massif fracturé est donc relativement laborieuse. Une possibilité existe néanmoins d'utiliser Resoblok comme pré processeur. Des contacts ont été pris dans ce sens et si ils aboutissaient, cette seconde piste pourrait me permettre une utilisation plus systématique de LMGC90.

6.3.2. Instrumentation d'ouvrage : suivi du creusement du tunnel de St Béat par interférométrie du champ sismique diffus

La rédaction de cette partie est largement inspirée du document de projet de recherche partenariale rédigé par Emmanuelle Klein de l'Inéris.

Comme nous l'avons mentionné en 4.2, je suis en train de monter un projet de recherche avec l'Inéris et la DREAL Midi-Pyrénées. Le but du travail engagé est de suivre le creusement du tunnel de St Béat, en milieu rocheux et fracturé, par une méthode de surveillance géophysique innovante basée sur le traitement du bruit sismique et connue sous la dénomination d'« interférométrie du champ diffus ».

Cette méthode consiste à utiliser les enregistrements des vibrations ambiantes et « diffuses » pour déterminer certaines propriétés physiques de la structure géologique traversée, à partir de la fonction de Green obtenue par corrélation de mesures de ce bruit (Lobkis et Weaver, 2001). C'est donc une alternative aux méthodes classiques d'imagerie et d'analyse du sous-sol qui utilisent des sources et des récepteurs sismiques et qui consistent généralement à comparer la forme d'onde reçue à l'onde émise pour en déduire l'information sur le milieu ausculté. Les différentes déclinaisons de la technique d'interférométrie du champ diffus permettent en effet de s'affranchir des difficultés liées à la mise en place des sources sismiques car l'information sur le milieu est obtenue par corrélation croisée des signaux enregistrés aux différents capteurs sismiques. Cette corrélation permet ainsi de reconstituer la fonction de Green du milieu. Si la qualité de cette fonction ainsi reconstituée n'égale pas celle obtenue par mesures traditionnelles, la sensibilité de cette fonction aux changements du milieu est beaucoup plus importante (Shapiro et Campillo, 2004). Les exemples d'application de cette méthode nouvelle d'auscultation restent encore peu nombreux dans la littérature et concernent principalement les risques naturels de type telluriques et volcaniques (Ritzwoller et al., 2005 ; Brenguier et al., 2008) ; à notre connaissance aucun ne porte sur l'application de cette méthode à l'échelle hectométrique.

Ce type de méthode de caractérisation et de suivi d'un site présente plusieurs avantages : ne pas perturber l'avancée du chantier, puisque les enregistrements se feraient à quelque distance, comprendre les phénomènes de propagations des ondes dans les roches à une échelle intermédiaire (entre la sismique et l'étude de laboratoire), pouvoir suivre des ruptures dans le massif en 3D, et pas seulement le long de l'axe de mesure (comme lors de la pose d'extensomètres par exemple).

L'application de cette technique sur le site de Saint-Béat présente un triple intérêt aux yeux de l'Inéris :

- *« le creusement d'un tunnel constitue un « cas d'école » : il s'agit d'une perturbation volumétrique forte du milieu rocheux (déconfinement et convergence, rabattement de nappe et chute du champ de pression, etc.), génératrice de bruit sismique au front de creusement, avec un avancement progressif mais rapide, facilement modélisable, toutes conditions idéales pour tester cette méthode à une échelle nouvelle. Le massif*

hôte est localement géologiquement bien reconnu et géotechniquement bien caractérisé.

- *si les résultats de cette expérimentation se révèlent positifs, ce projet de recherche ouvrira des perspectives intéressantes en termes d'auscultation et de surveillance de tunnels exploités et autres géostructures routières, la circulation routière étant une source quasi constante de bruit diffus avec ses composantes cohérentes.*
- *la présence locale de l'équipe du LRPC de Toulouse, impliquée sur le projet, constitue une opportunité unique pour mener une telle expérimentation pilote. »*

Ce projet de recherche partenariale devrait donc finalement comprendre deux volets principaux :

1. Un volet expérimental dédié à la réalisation d'une campagne de mesure de bruit sismique à l'aide d'un réseau microsismique temporaire installé depuis la galerie du Château pour l'acquisition des données avant, pendant et après le passage du front de creusement dans la zone d'étude, le traitement et l'analyse des données (la Figure 47 présente le schéma de localisation des capteurs proposé) ;
2. Un volet numérique, couplé à des essais en laboratoire et des relevés sur site, pour simuler la réponse du massif dans la zone d'étude et d'abord aider à la conception du dispositif de mesure de bruit, puis après creusement aider à l'analyse des résultats expérimentaux.

Le premier volet serait piloté par l'INERIS avec un appui du LRPC Toulouse pour les travaux sur site et la réalisation des travaux de forages nécessaire à l'instrumentation du site. Je piloterai le second volet au nom du LRPC Toulouse, avec un appui de l'INERIS pour la modélisation numérique.

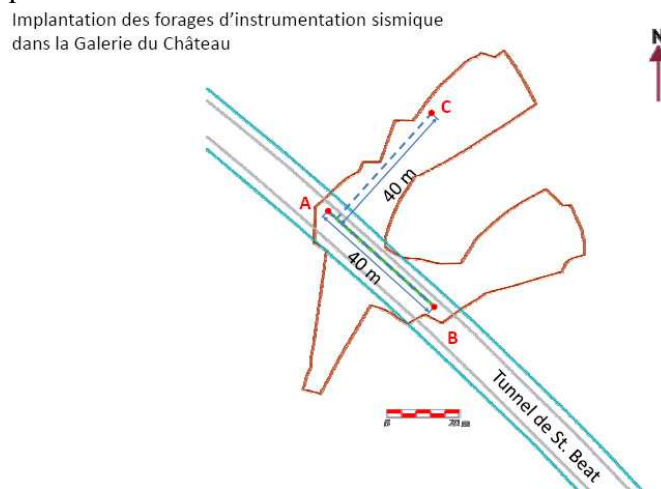


Figure 47 : Schéma d'implantation des sondes dans la galerie du château - St Bât (Inéris)

6.4. Autres pistes à explorer

Enfin, les nouvelles orientations du ministère, déclinées au sein du LRPC de Toulouse, me poussent également à investir quelques champs nouveaux liés au changement climatique et à l'observation de la terre. Ces champs sont appelés à se développer au cours des prochaines années.

6.4.1. Analyse du changement climatique

Un travail d'analyse a été mené en 2009, à travers le stage d'Héloïse Pahlol, sur l'étude de l'impact du changement climatique prévisible sur la région Midi-Pyrénées. Ce travail a conduit à la réalisation d'un atlas régional des mouvements de terrain et à l'identification de quelques sites propices à des instrumentations à long terme. Une courte synthèse a été effectuée sur la thématique du changement climatique ainsi que sur la typologie des mouvements de terrain et les paramètres influents. Une réflexion a été entamée avec Météo-France vis-à-vis des pluviométries influentes sur les glissements de terrain ainsi que sur la prise en compte de données météorologiques cartographiées à l'échelle régionale. Ce travail a donné lieu à la rédaction de [Ac20]. Il devrait être prolongé en 2010 dans le cadre d'une des opérations de recherche du LCPC par une analyse plus fine des scénarios de changement climatique et une réflexion plus fine sur la prise en compte du paramètre « pluie » (pluies extrêmes / décadaires / mensuelles / pluie efficace / etc.).

6.4.2. Essais de gel / dégel sur la « terre crue »

La terre crue est utilisée depuis très longtemps comme matériau de construction. Des questions se posent actuellement sur des approches de normalisations des méthodes utilisées et sur une caractérisation plus systématique du matériau lui-même. Un pôle de compétence locale est en train d'être monté sur la région Midi-Pyrénées, autour de l'articulation terre crue, fibres végétales et bâtiment. Ce pôle informel réunit à ce jour le LRT, le LMDC (université de Toulouse / INSA de Toulouse), le LRA (École Nationale d'architecture de Toulouse), l'association ARESO et plusieurs briqueterie locales partenaires du projet Tercruso.

Une des premières actions mise en œuvre dans le cadre de ce partenariat a été l'analyse de quelques briques de terre crue soumises à différents cycles de gel/dégel, afin d'avoir une approche en laboratoire de la réponse de ce matériaux à des conditions climatiques saisonnières. J'ai ainsi proposé un protocole expérimental permettant de caractériser par des mesures non destructives l'évolution de la rigidité de la terre crue au cours de cycles de gel / dégel.

Chaque groupe d'échantillon testé comprend 3 échantillons afin de vérifier la répétitivité des mesures. 4 groupes sont testés : les échantillons des groupes 1 à 3 proviennent de la même briqueterie, la dernière série, d'une briqueterie différente. Les groupes subissent une histoire hygrométrique différente avant l'application des cycles de gel/dégel :

- groupe 1 : échantillons humidifiés à 95%HR puis conservés et testés dans l'enceinte climatique dans du papier cellophane ;
- groupe 2 : échantillons humidifiés à 95%HR puis testés dans l'enceinte climatique à l'état libre ;
- groupe 3 : échantillons séchés à l'air libre puis testés dans l'enceinte climatique à l'état libre ;
- groupe 4 (origine différente) : échantillons humidifiés à 95%HR puis testés dans l'enceinte climatique à l'état libre

Les cycles de gel/dégel réalisés sont tels que décrits dans la norme NF EN 12370 à ceci près que le dégel ne se fait pas sous immersion (pour ne pas dégrader la structure de la terre crue). 4 série de 8 cycles de gel / dégel sont appliqués. A l'état initial et à l'issue de chaque série, les éprouvettes sont pesées, mesurées et les vitesses des ondes P sont enregistrées, ce qui permet de caractériser l'endommagement de la roche.

Les résultats expérimentaux obtenus ont montré un écoulement sous désaturation des argiles contenue dans la terre crue. Ce phénomène est relativement intéressant et nouveau, bien que déjà mis en évidence par (Ghorbani et al., 2009). Ces premiers travaux doivent se prolonger, notamment en vérifiant les premières observations par la réalisation d'essais de compression simple et de mesures des modules. Une publication avec l'INSA (Jean-Emmanuel Aubert) devrait être rédigée début 2011.

6.4.3. ANR Flash Haïti

Le LRPC de Toulouse développe depuis une petite année une compétence dans le domaine de l'observation de la terre, à partir de partenariats avec le CNES, entre autre. Ainsi, il m'a été demandé d'être la correspondante du LRPC de Toulouse et plus généralement du CETE du Sud-Ouest pour un projet qui vient d'être soumis (le 9 avril dernier) dans le cadre de l'appel d'offre ANR flash Haïti. Ce projet, « KAL-Haïti », est à l'instigation du CNES. Il a pour but de proposer la création d'une base de donnée Recherche pour la gestion du risque et la reconstruction durable en Haïti.

Dans le cadre des activités de support à la science et aux recherches et développements appliqués, quatre bases de données Kalideos sont actuellement opérationnelles au CNES. Il est proposé dans KAL-Haïti de créer une cinquième base de données dédiée à la thématique « cycle complet de la gestion des risques et reconstruction durable en Haïti », et de faire vivre et grandir le groupe des scientifiques et utilisateurs associés.

Ce projet est de type « collaboratif », c'est à dire qu'une large part va être laissée aux utilisateurs potentiels (contributeurs), certains sont déjà identifiés, d'autres pourront se faire connaître au cours du projet. Mon rôle dans ce projet, s'il est retenu, sera de fédérer les différents contributeurs au projet, et en particulier de faire l'interface avec la demande institutionnelle, réglementaire et opérationnelle dans la sphère d'influence du MEEDDM. Sont d'ors et déjà identifiés, outre d'autres participant du CETE Sud-Ouest, la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), les membre de l'ERA du LRPC de Nice (CETE Méditerranée), ainsi que le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), le CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques), la Direction Départementale des Territoires de Haute Garonne, le LCPC, Météo-France, l'IGN (Institut Géographique National) et l' INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité).

Ce projet peut sembler éloigné de mes travaux de recherche actuelle, mais, d'une part, l'utilisation de bases de données constituées d'images satellite pourrait se révéler très intéressante pour le suivi de mouvements rocheux et d'autre part il devrait me permettre de développer des contacts intéressants dans divers milieux universitaires et institutionnels.

7. Bibliographie (autre que citée en 2)

AFNOR, Cisaillement direct selon une discontinuité de roche – Essai sous un effort constant, normal à la surface de discontinuité. Norme XP P 94-424, 1993.

AFTES, recommandations relatives à la caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains. Tunnels et ouvrages souterrains n°177, 138-186. 2003.

AFTES, Apport des techniques pétrolières et minières de forage et diagraphie à la reconnaissance des grands ouvrages souterrains. Tunnels et ouvrages souterrains n°184, 176-288. 2004.

ASOF M., Etude du comportement mécanique des massifs rocheux fracturés en blocs (méthode à l'équilibre limite) : réalisation et applications. Thèse de doctorat de l'INPL de Nancy, 142 p. 1991.

ASTM D 5607-02. -Standard test Method for Performing Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. Norme américaine. CD-Rom annuel.

BAROUDI H., ASOF M., PIGUET J.-P., Bench stability in open pit mines : a methodology for jointed rock masses. Regional conference on fractured and jointed rock masses. Lake Tahoe, California, June 3-5 1992.

BARTON N. CHOUBEY V. « The shear strength of rock joints in theory and practice », Rock Mechanics, vol. 10 (1-2), p. 1-54, 1977.

BARTON N. General report concerning some 20th century lessons and 21st century challenges in applied rock mechanics, safety and control of the environment. Proc. 9th ISRM. Vouille & Bérest Ed. Paris A.A. Balkema. 1659-1679. 1999.

BARTON N., GRIMSTAD, E., The Q-System following twenty years of application in NMT support selection. 43rd Geomechanics Colloquy, Salburg. Felsbau, 6/94: 428-436 1994.

BARTON N.R., LIEN R., LUNDE J., Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech , 6(4), 189-239. 1974.

BEDJAOUI M.C, ALLAL M.A., GHOMARI F. Autour du problème des discontinuités sur la stabilité d'un massif rocheux. Conférence internationale de Géotechnique – Beyrouth 2004.

BEKAERT A., MAGHOUS S. Three-dimensional yield strength properties of jointed rock mass as a homogenized medium. Mechanics of Cohesive Frictional Materials vol 1, 1-24, 1996.

BEMANI YAZDI P. Modélisation de la stabilité des massifs rocheux avec prise en compte de l'endommagement des joints et des effets hydromécaniques. Thèse de l'ENPC. 2009.

BIENIAWSKI Z.T. Rock mass classification in rock engineering. Proc. Symp Exploration for rock engineering Cape Town, Balkema, 1, 97-106, 1976.

BIENIAWSKI Z.T. Engineering rock mass classifications : a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. J. Wiley, 1989.

BILLAUX, D. *Hydrogéologie des milieux fracturés. Géométrie, connectivité et comportement hydraulique* Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1990; Document du BRGM 186, Orléans, BRGM, 1990.

BOST M., *Altération par le gel des massifs rocheux : étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures*. Thèse de l'ENPC, 2008.

BRENGUIER F. SHAPIRO N.M. CAMPILLO M. FERRAZZINI V. DUPUTEL Z. COUTANT O. NERCESSIAN A. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nature Geoscience* 1, 126-130. 2008.

BUDIANSKY R.J., O'CONNELL R.J. Elastic moduli of a cracked solid. Int. J. of Solids and Structures, vol 12, 81-97 1976.

BUHAN (DE) P., MAGHOUS S. Comportement élastique non linéaire macroscopique d'un matériau comportant un réseau de joints. C.R. Acad. Sci., Paris, t 324, série IIB, 209-218, 1997.

CACAS M.C., DANIEL J.M., LETOUZEY J. Nested geological modelling of naturally fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, vol 7, 43-52. 2001.

CAI M., HORII H. A constitutive model of highly jointed rock masses. *Mech. of Mat.* vol 13, 217-246. 1992.

CAI M., HORII H. A constitutive model and FEM analysis of jointed rock masses. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abstr.* vol 30 n°4, 351-359, 1993.

CFMR (Comité Français de Mécanique des Roches) Manuel de mécanique des roches Tome 1 – Fondements. Les presses de l'École des Mines de Paris, 2000.

CHANTRON L., ZUMBO V. : Formalisation des critères descriptif d'un massif rocheux – Mise au point d'une feuille de saisie des discontinuités. *JNGG 2002, 8 et 9 Octobre 2002, Nancy*.

CHILÈS J.P., GENTIER S., « Geostatistical modelling of a single fracture », International Congress for Geostatistics, Troia, p. 95-108, 1992.

CHILÈS J.P., Le variogramme généralisé, Rapport N-612, Fontainebleau, 1979.

COSTE F. *Comportement Thermo-Hydro-Mécanique des massifs rocheux fracturés*. Thèse de Doctorat de l'ENPC, 1997.

CUNDALL P.A. A computer model for simulation progressive, large scale movements in blocky rock systems. *Int. Symp. on Rock Fracture, ISRM, Nancy (France) vol 1, paper n°II.8, 1971.*

CUNDALL P.A., HART R. Development of generalized 2D and 3D distinct element programs for modelling jointed rock. Itasca Consulting Group. Misc. Paper SL-85-1, U.S. Army Corps of Engineers, 1985.

DARVE F., G. SERVANT, F. LAOUAFA, KHOA H.D.V. Failure in geomaterials : continuous and discrete analyses. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 193 :3057–3085, 2004.

DEERE D.U., MILLER R.P., 1966 : Engineering classification and index properties for intact rocks. Technical report n° AFNL-TR-65-116, Air Force Weapon Laboratory, New Mexico.

DEZAYES C. Caractérisation et interprétation d'un volume rocheux fracturé à partir de données de forages – les forages thermiques de Soultz-sous-forêts. BRGM Ed. 1996

DURIEZ J. Stabilité des massifs rocheux : Une approche mécanique. Thèse de l'Institut polytechnique de Grenoble, 2009.

ESCOFFIER S., CATEL P., GIAFFERI J.-L., 1999 : Retour d'expérience sur les méthodes empiriques d'évaluation du soutènement à mettre en oeuvre lors de projets d'excavations souterraines. *Proc. 9th ISRM. Vouille & Bérest Ed. Paris A.A. Balkema. 361-366.*

FLAMAND R. Validation d'une loi de comportement mécanique pour les fractures rocheuses en cisaillement, thèse de doctorat, université du Québec à Chicoutimi (Canada), 470 p. 2000.

FORTIN J., SCHUBNEL A., GUEGUEN Y., 2005 : Elastic wave velocities and permeability evolution during compaction of Bleurswiller sandstone *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sc.*, Vol.42, 873-889, 2005.

FOUCHÉ O. Caractérisation géologique et géométrique et modélisation 3D des réseaux de discontinuités d'un massif granitique reconnu par forage carottés, massif de Charroux-Civray (Vienne, France). Thèse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées – spécialité géologie de l'ingénieur, 1999. 296p + annexes.

FRANK C., DÜNNER C., LAOUAFA F., SENFAUTE G., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., CLÉMENT C., GUNZBURGER Y., GUGLIELMI Y., LANÇON H., MUDRY J., DARVE F., DONZÉ F., DURIEZ J., POUYA A., GASC M., WASSERMANN J. : STABROCK Impact des changements climatiques sur la stabilité des fronts rocheux : Observation, Expérimentation et Modélisation Rapport Final Mars 2010. DSR-10-98113-02244A.

GENTIER S., Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale – Étude expérimentale et théorique, Thèse de l'Université d'Orléans – Spécialité Mécanique des Roches, 1986.

GENTIER S., Les massifs rocheux fracturés : de la fracture à la géothermie, Habilitation à Diriger les recherches de l'Université de Bordeaux, 2004.

GERVAIS F., RISS J., GENTIER S., Caractérisation stéréologique de la géométrie d'un massif rocheux fracturé : application aux carrières de Comblanchien (Côte d'Or, France). *Bull. Soc. Géol. France*, 1993, t. 164, n°3, 459-471.

GHORBANI A., ZAMORA M., COSENZA P., Effects of dessication on the elastic wave velocities of clay-rocks. *Int. J. of Rock Mechs and min Sc*, Vol.46, 1267-1272, 2009

GOODMAN R.E. & SHI G.H., 1985 : Block theory and its application to rock engineering. New Jersey: Prentice Hall.

GRASSELLI G., WIRTH J., EGGER P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing. *Int. J. of Rock Mechs and min Sc*. Vol 39(6) 789-800, 2002

HOMAND F, BELEM T, SOULEY M., Friction and degradation of joints surfaces under shear loads. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 2001, 25, 973-999.

HELIOT D., Conception et réalisation d'un outil Intégré de modélisation des massifs rocheux fracturés en blocs. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 1988

ISRM (International Society of Rock Mechanics), The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring - 1974-2006. Ulusay & Hudson eds. Ankara, Turkey. 628p. 2007.

JAEGER J.C., COOK N.G, *Fundamentals on rocks mechanics* Chapman et Hall, 1979.

JEAN M., Acary V., Monerie Y., Non Smooth contact dynamics approach of cohesive materials. In, *Proceedings of the Royal Society (Special Exit one not smooth mechanics)*; 2001.

JEAN M., The non-smooth contact dynamics method. *Comput Methods Appl Mech Eng*;177:235-257, 1999.

JIANG Y., LI B., TANABASHI Y. « Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints » *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. vol 43, p. 837-846, 2006.

KABBAJ R., BAROUDI H., 1995 : Traitement statistique de la fracturation – étude bibliographique. Séminaire de Formation « modélisation des milieux discontinus » 11-15 sep. 95, Ecole des Mines de Nancy.

KORINI T., SOUKATCHOFF V., BENNANI M., 1995 : Optimisation du soutènement par boulonnage des excavations creusées dans un massif rocheux fracturé en blocs. Séminaire de Formation « modélisation des milieux discontinus » 11-15 sep. 95, Ecole des Mines de Nancy.

KULATILAKE P.H.S.W., SHOU G., HUANG T.H., MORGAN P.M., « New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, vol. 32, p. 673-697, 1995.

Laurent S. Imagerie optique et acoustique en forage pour l'obtention de données structurales précises *Géoline* 2005, Lyon, France, BRGM ed. 2005.

LAUBSCHER D.H., 1990 : A geomechanics classification system for the rating of rock mass in a mining design. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* (1990) 257-272

LOBKIS O.I. WEAVER R.L. On the emergence of Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110, 3011-3017, 2001

LOCKNER D.A., BYERLEE J.D., KUKSENKO V., PONOMAREV A., SIDORIN A., Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature* 350, 39-42, 1991

LOPEZ P. Comportement mécanique d'une fracture en cisaillement : analyse par plan d'expérience des données mécaniques et morphologiques connues sur une fracture. Thèse de l'Université de Bordeaux I. 2000.

LOUIS C. Reconnaissance des massifs rocheux par sondages et classifications géotechniques des roches. *Sols et fondations*, 108, n°319, 97-122, 1974.

MAKSIMOVIC M. The shear strength components of a rough rock joint. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abst.*. Vol 33 (8), 1996

MAKSIMOVIC M. A Family of Nonlinear Envelopes for Non-Cemented Soils and Rock Discontinuities. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 2002. www.ejge.com.

MANDELBROT B.B., Les objets fractals – Forme, hazard et dimension, Flammarion, 1975.

MARACHE A., Comportement mécanique d'une fracture rocheuse sous contraintes normale et tangentielle, Thèse de l'Ecole Centrale Paris – Spécialité Géomécanique, 319p + annexes, 2002.

MARACHE A., RISS J., GENTIER S., « Experimental and modelled mechanical behaviour of a rock fracture under normal stress », *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 41, p. 869-892, 2008.

MARCOTTE D., 2000 : Traitement statistique des données géologiques. Cours GLQ3402. Ecole Polytechnique Canada. Version 2.5.

MARDIA K.V., *Statistics of directional data*, Academic Press, 1972.

MAZZOLENI G. « L'essai de cisaillement de discontinuité rocheuse Procédure et interprétation ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* 211, 1997, p.89-99.

MERRIEN- SOUKATCHOFF V., KORINI T., THORAVAL A., RESOBLOK - an integrated computer code for stochastic analyses of fractured rock masses, *Rock Mechanics and Rock Engineering* soumis.

MOREAU J.J., An introduction to unilateral dynamics In: *Novel Approaches in Civil Engineering* (M. Frémond and F. Maceri, Eds.). In: Springer Verlag; 2003.

MOREAU J.J., Unilateral contact and dry friction in finite freedom dynamics, in: J. Moreau, e. P.-D. Panagiotopoulos (eds), *Non Smooth Mechanics and Applications* In, CISM Courses and Lectures: Springer-Verlag, Wien, New York; 1988:1-82.

POUYA A., GHOREYCHI M., 2001 : Determination of rock mass strength properties by homogenisation, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 25, (2001), 1285-1303.

PRIEST S., *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall. 1993.

RAFIEE A., VINCHES M., BOHATIER C., Comportement mécanique d'un massif rocheux fracturé considéré comme une collection d'éléments discrets : apports de la méthode Non-Smooth Contact Dynamics RFG n°128, p. 27-33, 2009.

RAJMENY P.K., SINGH U.K., RATHORE S.S., 2004 : A new model to estimate rock mass strength accounting for the scale effect. *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sc.* 41(2004) 1013-1021.

RAMAMURTHY T., 2004 : A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sc.* 41 (2004) 89-101.

RISS J., GENTIER S., FLAMAND R., AARCHAMBAULT G., 1998 : Detailed description of the morphology of a fracture in regard of its behaviour during shearing. *MJFR* 3, Vienna, Austria, April 6-9, 1998

RISS J., GENTIER S., HOPKINS D., 1998 : Shear behaviour of rock joints : prediction of the damaged areas using mathematical morphology. *Acta Stereol.*, Original Scientific Paper, Vol 17 N° 3 pp.303-308

RITZWOLLER M.H. SHAPIRO N.M. PASYANOS M.E. BENSEN G.D. YANG Y. Short period surface wave dispersion measurements from ambient seismic noise in North Africa, the Middle East, and Central Asia. 27th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring. Palm Springs, Proceedings, 161-170. 2005

SHAPIRO N.M. CAMPILLO M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters* 31, L07614. 2004

SIRIEYS P., 2001 : Structure, contraintes lithostatiques et notations des massifs rocheux. *Revue Française de Géotechnique*. 97. 53-59.

STARFIELD A.M., CUNDALL P.A., 1988 : Approche d'une méthodologie pour la modélisation en mécanique des roches. Traduction de l'Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 25 vol 3 99-106

SU S., 2004 : Effect of fractures on in situ rock stresses studied by the distinct element method. *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sc.* 41(2004) 159-164.

TESSIER D. 1984. "Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation." PhD Thesis, Université Paris 7.

UPON G.J.G., FINGLETON B., 1989 : *Spatial data analysis by examples* (vol 2 – chap. 9 & 10)

WANG S.J., LEE C.F., YUE Z.Q., 2004 : Global quality assessment of rock works for permanent shiplock of the Three Gorges Project on Yangtze River, China. *Engineering Geology* (76) 41-64.

WARBURTON P.M., Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free face. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 18 (1981) 415 –427.

WASSERMANN J., Etude expérimentale de l'endommagement des roches par méthodes acoustiques. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.

WASSERMANN J., SENFAUTE G., AMITRANO, D., HOMAND, F. Evidence of dilatant and non-dilatant damage processes in oolitic iron ore: P-wave velocity and acoustic emission analyses. *Geophysical Journal International*, vol 177, n°3, pp 1343-1356. 2009

YANG Z.Y., DI C.C., « A directional method for directly calculating the fractal parameters of joint surface roughness », *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38, p. 1201-1210, 2001.

ZANG A., WAGNER F.C., STANCHITS S., DRESEN D., ANDRESEN R., HAIDEKKER M.A., Source analysis of acoustic emission in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads. *Earth Phys. J. Int.* 135: 113-1130, 1998.

ZHAO J. Notes de cours, année 2008 – Partie 3 : Propriétés des discontinuités. http://lmrwww.epfl.ch/fr/ensei/Mecanique_des_Roches/ENS_080312_FR_JFM_Lecture_2008_Part_3_French.pdf.

8. glossaire

AERES :	Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement supérieur.
AFTES :	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain
CERTU :	Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
CETE :	Centre d'Étude Technique de l'Équipement.
CETU :	Centre d'Étude des Tunnels. Service technique central relevant du MEEDDM.
CNAM :	Conservatoire National des Arts et Métiers. J'ai travaillé essentiellement avec O. Fouché, de la chaire de Géologie, Paris.
CNES :	Centre National d'Études Spatiales.
CSTB :	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
DGPR :	Direction Générale de la Prévention des Risques.
ERA :	Équipe de Recherche Associée sous-entendu, associée au LCPC. Il existe à l'heure actuelle une quinzaine d'ERA répartie dans les différents laboratoires régionaux, dont 5 liées aux problèmes géotechniques : à Lyon sur les chutes de blocs, à Nice sur les aspects sismiques, à Aix-en-Provence sur les sols durs/roches tendres, et à Rouen sur la géotechnique routière et enfin, à Toulouse, sur la mécanique des roches.
GER :	Département du LCPC : Géotechnique, Eau et Risques. GER2 est plus spécifiquement le groupe « Comportement des sols des roches et des ouvrages »
IGN :	Institut Géographique National.
INERIS :	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.
INRETS :	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.
LAEGO :	Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages. Situé à Nancy, c'est un laboratoire de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, constitué de membres de l'École des Mines de Nancy, et l'École Supérieure de Géologie et de l'Inéris.
LCPC :	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
LRPC :	laboratoire Régional des Ponts et Chaussées. Il y a 17 LRPC en France.
MEEDDM :	Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer.
MSRGI :	unité Mécanique, des sols, des roches et géologie de l'ingénieur, unité du LCPC, « tutelle » de notre ERA. Aujourd'hui remplacée par GER2

Annexe 1 : Présentation des sites d'étude

L'ensemble de mon travail s'appuie sur des sites qui font l'objet d'étude, le plus souvent dans le cadre de projets routiers. Il me paraissait donc important de caractériser le mieux possible chacun de ces sites, afin de rendre la lecture du mémoire plus agréable.

Les études décrites s'appuient plus particulièrement sur les sites de :

- St Béat, le long de la RN 125 en Haute-Garonne ;
- Le Pallat le long de la RN 116 dans les Pyrénées Orientales ;
- Ax-les-Thermes, le long de la RN 20 en Ariège ;
- Le viaduc sur le Viaur, le long de la RN 88 dans le Tarn ;
- Les Rochers de Valabres, le long de la RD 2205, dans les Alpes Maritimes.

Leur localisation se retrouve sur la Figure 48.

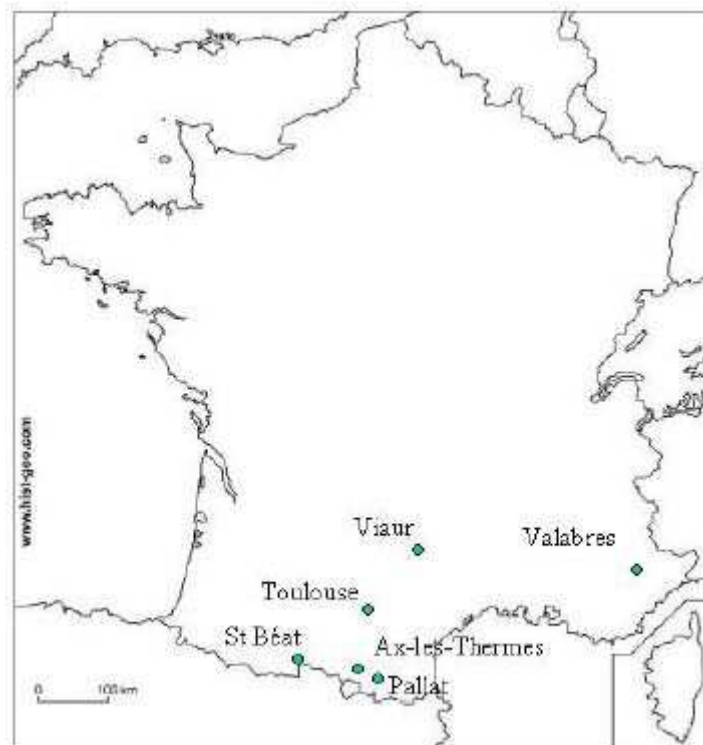


Figure 48 : Localisation des principaux sites d'étude

St Béat

La R.N. 125 est un des seuls passages entre la France et l'Espagne,   basse altitude, dans les Pyr enes centrales. Cet itin eraire traverse la ville de St Béat au niveau d'une cluse cr ee par la Garonne. La ville est situ ee dans une vall ee encaiss ee, sur les rives du fleuve, accol ee   la montagne et surplomb ee par des falaises (voir Figure 49). Pour assurer le passage du trafic, c'est donc la solution tunnel qui a  t e retenue.

Du point de vue de la g eologie r egionale, le site fait partie de la zone interne m etamorphique des Pyr enes, zone qui a  t e fortement tectonis ee au cours de l'histoire des surrections pyr en ennes, ce qui a entraînée une fracturation importante. Le projet de tunnel recoupe essentiellement des terrains de l'ère secondaire datées du Lias   l'Albien inf erieur qui correspondent   une lithologie dominante calcaire plus ou moins m etamorphis e en marbre.

Ce site d'étude est particuli erement int eressant, car c' est un des rares site pour lequel nous pouvons obtenir des renseignements dans les trois directions de l'espace. En effet, le marbre est exploitée depuis l'antiquit e, initialement pour ses blocs et la r ealisation de statues ou de construction (fontaine du jardin du ch ateau de Fontainebleau, par exemple), et actuellement plut ot tournée vers la charge min erale. L'exploitation actuelle par la soci et e OMG, se situe sur la rive oppos ee de la Garonne, mais le propri etaire de l'exploitation nous a laissée libre acc es   une ancienne galerie, creus ee dans le massif du Cap du Mont, dite « galerie du ch ateau », qui a le bon gout d'être exactement au droit de l'axe du futur tunnel et   50m   peine au dessus (dessin ee en bleue sur la Figure 50). Ainsi, nous seulement cette galerie nous permet d'acc eder   la fois au c oeur du massif, mais également   du rocher quasiment sain (alt er e uniquement par le creusement initial).



Figure 49 : Village de St Béat – positionnement de l'axe du futur tunnel et position actuelle de la route. *Photo Vincent Constant*

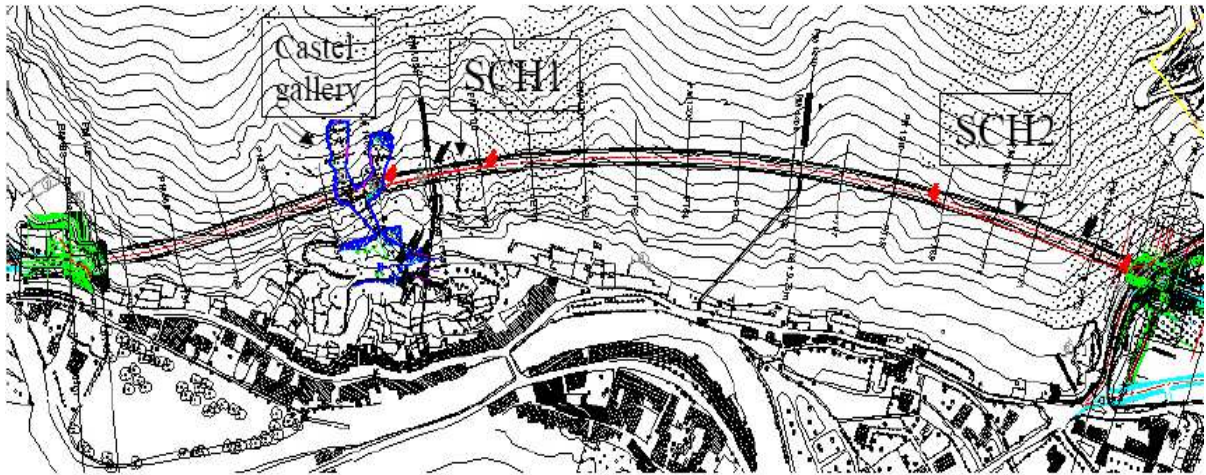


Figure 50 : Tracé du tunnel.

Noter les emplacements de la Garonne, du village, de la galerie du château (en bleu) et des sondages SCH1 et SCH2 (en rouge), ainsi que le tracé du futur tunnel

Les études initiales ont été menées dans le cadre de la création de la déviation, et nous avons donc pu bénéficier des données de forage et de diagraphies réalisées dans ce cadre. A partir de l'ensemble des données du site, différents travaux de recherche ont été réalisés :

- analyse de la fracturation en fonction des moyens utilisés pour le levé (lignes de mesure, carottes, diagraphies) avec estimations des biais induits. Analyse statistique de la fracturation (collaboration Cetu – Cnam) [Soum1, Ac17] ;
- analyse de stabilité du site (Resoblok) [Ar7] ;
- Modélisation géomécanique 2D du site (UDEEC), étude de l'ouverture des fractures au cours du déconfinement lié au creusement du tunnel (en cours, non publié) ;
- Quelques échantillons utilisés pour l'étude des cycles de gel/dégel (non publié) ;
- Caractérisation de l'influence de la morphologie sur le comportement mécanique des discontinuités (thèse de Melle Nhan Hoang, collaboration avec le GHYMAC) [Ac21, Ac19, Ac18, Ac16] ;
- Projet de mise en place d'une expérimentation in situ pour le suivi du creusement par méthodes acoustiques (cf perspectives) ;
- analyse géologique au cours de l'avancement du tunnel, prise en compte des aléas de chantier (thèse de Melle S. Mahé, en cours de finalisation du programme, début prévu au 1^{er} juillet 2010) collaboration école des Mines d'Alès, université de Montpellier, Dréal Midi-Pyrénées (cf perspectives) ;
- Caractérisation de la fracturation et modélisation du site par éléments discrets (thèse de Mme Tran, débutée à la mi-mars 2010) collaboration école des Mines d'Alès, université de Montpellier (cf perspectives).

Les lacets du Pallat

La zone d'étude est localisée sur la RN116, dans les Pyrénées Orientales, entre Prades et Mont Louis (voir zone entourée de rouge sur la Figure 51). Cette route est la voie d'accès à la Cerdagne et à Andorre depuis Perpignan.

Du point de vue géologique, la zone recoupe deux grands ensembles :

Les migmatites : « ensemble qui à l'échelle de l'affleurement est un mélange de roches de types granite et gneiss, celui-ci, en général, à grain grossier et à foliation souvent peu marquée ou confuse (...). Ces roches sont à la limite des roches métamorphiques catazonales et des roches magmatiques et leur genèse est liée à une fusion partielle (...). À l'affleurement ces migmatites sont hétérogènes (gneiss ocellé, granite, leptynite) et recoupées par des filons (leucogranite, quartzite) » *Dictionnaire de géologie*.

Les micaschistes : il s'agit ici de roches métamorphiques grises à patine « rouille », à grain moyen, à schistosité plane et bien marquée, riche en lamelles de mica visibles à l'œil nu et à débit facile en plaques. Les lits de mica (parallèles à la schistosité) forment des surfaces brillantes propices aux glissements plans. Les micaschistes ont pour origine des argiles, des pélites ou encore des pélites calcareuses. Ceci se traduit par la présence de micaschistes dit « argileux » plus tendres par opposition aux micaschistes très massifs (quasi gneissiques) que l'on retrouve à l'amont du créneau du Pallat

Ces deux formations sont structurellement et géographiquement proches, pour les différencier sur le terrain, le principal critère est l'absence d'orientation des minéraux des roches dans le secteur des migmatites alors que cette orientation apparaît clairement (par une schistosité ou une foliation) dans le secteur des « micaschistes ». La zone du Pallat n'est que partiellement représentée sur la carte géologique de Prades au 1/50 000^{ème}. Le reste se retrouverait sur la feuille de Mont-Louis qui n'est malheureusement pas éditée par le B.R.G.M.

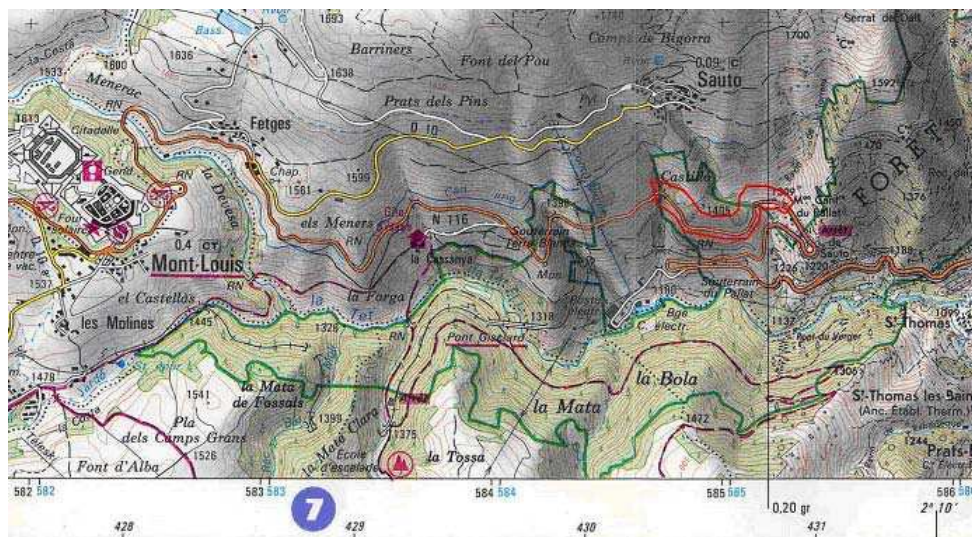


Figure 51 : Carte IGN de la zone des lacets du Pallat



Figure 52 : Photo des lacets du Pallat

Les études initiales ont été menées dans le cadre de l'agrandissement de la voirie par la création de zones de doublement et de rectification de virages, qui ont conduit à la création de plusieurs talus en milieu rocheux d'une vingtaine de mètres de haut.

A partir des données de ce site, différents travaux de recherche ont été réalisés : analyse statistique des données de fracturation, en collaboration avec le GHYMAC [Ac12 et Com6], modélisation 3D du site (avec LMGC) pour comparer les mécanismes de déclenchement des instabilités de blocs [Rafiee et al, 2009]. Il est prévu, sur ce même site de poursuivre l'analyse des instabilités en étudiant l'influence d'un séisme.

Ax-les-Thermes

La zone d'étude est localisée sur la RN20, en Ariège, le long de la ville d'Ax-les-Thermes. Il s'agit de la principale voie d'accès en Andorre depuis Toulouse. Le projet, d'une longueur de 4,5 kilomètres permet le contournement de l'agglomération d'Ax-les-Thermes par le sud-ouest. La déviation débute au niveau de la Zone Industrielle de Savignac-les-Ormeaux et se termine au niveau de la première Bazerque, au sud de la ville après le franchissement de l'Ariège par un viaduc de 280 mètres (Figure 53).

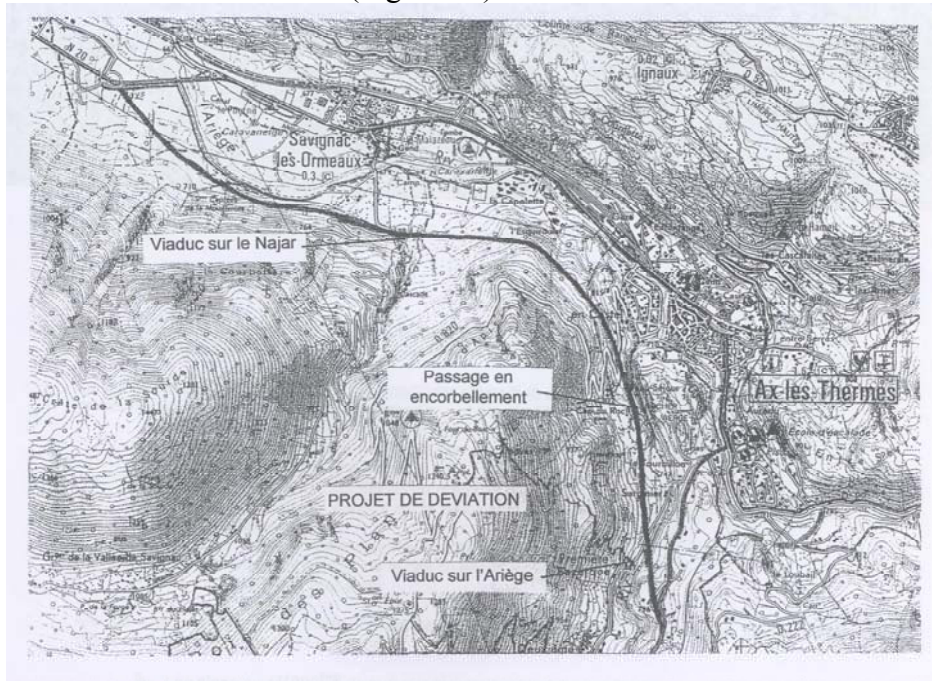


Figure 53 : déviation d'Ax-les-Thermes

Du point de vue géologique, la ville d'Ax-les-Thermes est située dans la zone primaire axiale des Pyrénées. Les faciès que l'on peut retrouver à Ax-les-Thermes sont des granites acides à muscovites ou des migmatites granitoïdes (faciès d'anatexie). Il semble que l'origine de ce massif granitique soit tardi-hercynien. De nombreux dépôts du Quaternaire comme les dépôts fluvio-glaciaires recouvrent en partie les formations cristallines. Ces formations meubles d'épaisseur variable sont surtout présentes le long de l'Ariège. Finalement, la déviation de la RN 20 traversera, en sus des formations superficielles du Quaternaire, un substratum rocheux datant de l'orogénèse Hercynienne, et plus particulièrement :

- **des roches plutoniques** qui sont surtout visibles à l'extrémité sud de la future déviation (proche du viaduc sur l'Ariège). On retrouve du granite gris à deux micas (type granite d'Ax-les-Thermes), du granite aplitique (granite à grains fins) ou des pegmatites (granite à gros grains). Ces différents faciès sont intimement liés, et les variations de faciès, tant horizontales que verticales, sont très importantes. L'état d'altération et de fracturation du massif est hétérogène le long du tracé. Certaines zones peuvent être saines alors que quelques mètres plus loin, le granite sera fortement altéré.
- **Les roches métamorphiques** correspondent à des gneiss œillets ou des gneiss leptyniques. Ces formations se rencontrent au début du tracé de la future déviation au nord d'En Castel. La transition entre les gneiss et le granite est assez diffuse, de nombreuses intrusions granitiques étant présentes au sein du massif gneissique. Les deux faciès gneissiques sont étroitement associés, la séparation en deux zones

distinctes correspondant à ces deux formations n'est donc pas possible. On parlera dans ce cas de figure de migmatite, au sens large, pour ce type de formation. Un gneiss micaschisteux a également été identifié localement, au niveau du camp SNCF de Savignac-les-Ormeaux. Ce gneiss de couleur sombre est très riche en micas.

Les études initiales ont été menées dans le cadre de la création de la déviation. La Figure 54 présente les déblais en cours de réalisation (environ 12m ont été creusés au moment de la photo).



Figure 54 : Photo des déblais rocheux en cours de réalisation et exemple de ligne de mesure exploitée



Figure 55 : Photo des déblais rocheux réalisés

A partir des données de ce site, différents travaux de recherche ont été réalisés : analyse statistique des données de fracturation, en collaboration avec le GHYMAC [Ac12], modélisation 3D du site (avec Resoblok) pour valider les options de clouage proposées lors de la phase étude, et identifier les mécanismes de déclenchement des instabilités de blocs [Ar8, Ac15]. Des modèles géomécaniques Udec 2D ont également été réalisés pour appréhender les ouvertures de fractures. Enfin, différents essais de cisaillement ont été réalisés sur les matériaux du site [Ar11 et Ar9].

Viaduc sur le Viaur

Le site d'étude retenu se situe dans la partie sud-ouest du Massif central entre le Tarn et l'Aveyron, le long de la RN 88 (cf. Figure 2), à mi-chemin environ entre Albi et Rodez. Le viaduc a été réalisé au cours des dernières années, pour l'élargissement de la RN 88 et il permet de relier les communes de Tauriac de Naucelle et Tanus. Long de 570 m, il surplombe le Viaur à 130 m (Figure 56).

La carte géologique définit la zone de l'ouvrage comme « porphyroïdes et greywackes associés » (gneiss clairs et bien foliés). Une analyse plus précise de la zone au droit des piles a permis de confirmer le substratum métamorphique : on rencontre essentiellement des leptynites (variété de gneiss) et des séricitoshistes (variété plus fine de micaschistes). De plus on note une profondeur d'altération de 10 à 20 m en général, ainsi que la présence d'éboulis de pente qui se présentent comme des argiles limoneuses ou sableuses à débris de quartz, de leptynites ou de séricitoshistes, dont l'épaisseur se réduit à moins d'un mètre.

L'étude a été reprise pour s'appuyer sur un cas concret de fondations au rocher sur un versant fracturé. Le viaduc a été inauguré dans les années 90. le travail réalisé a été mené en collaboration avec le LCPC par une modélisation géomécanique 2D du site (UDEC). Et comparaison des résultats obtenus avec Cesar-LCPC [Ac11].



Figure 56 : Photo du Viaduc sur le Viaur.

La pile plus particulièrement étudiée est entourée en violet.

Les rochers de Valabres

La zone des rochers de Valabres se situe dans la vallée de la Timnée. La RD 2205 est la route menant, entre autre, à Isola 2000 depuis Nice. Cette zone a été source d'éboulement à plusieurs reprises, dont celui du 20 mai 2000 (Figure 57) qui a entraîné la coupure de la route plusieurs semaines et la création d'une nouvelle route sur le versant en face.

Du point de vue géologique, la haute vallée de la Timnée, en amont de St Sauveur, traverse des roches métamorphiques du socle hercynien de l'Argentera-Mercantour, ici des paragneiss migmatitiques et des orthogneiss meta-granitiques [Gunzberger, 2004]



Figure 57 : Éboulement du 20 mai 2000 – Photo A. Calvino (LRPC Nice)

Nous avons été amenés à travailler sur ce site, hors de notre zone d'action par notre participation au projet Stabrock (projet national financé par le PGCU).

Dans le cadre de ce projet était initialement prévu des essais mécaniques avec enregistrement de l'émission acoustique. Nous avons finalement, avec l'aval des différents partenaires, réalisé beaucoup plus : la caractérisation de l'anisotropie de la roche en utilisant à la fois les vitesses des ondes élastiques et l'émission acoustique [Soum2, Ac22, Ac13, Com9 et *en prep*], des essais de cisaillement sur discontinuités avec des trajets de chargements complexes [Ar10 et *en prep*], des essais de gel dégel, etc...

Ces travaux ont été menés en collaboration avec les participants de projet et plus particulièrement : l'Inéris, le LCPC, l'Université de Grenoble, l'École des Mines de Nancy, et l'Institut de Physique du Globe de Paris.