HAL
open science

Etude en laboratoire de l'anisotropie des roches par méthode ultrasonique : Application au gneiss de Valabres (Alpes-Maritimes)

Muriel Gasc Barbier, Jérôme Wassermann

To cite this version:

Muriel Gasc Barbier, Jérôme Wassermann. Etude en laboratoire de l'anisotropie des roches par méthode ultrasonique : Application au gneiss de Valabres (Alpes-Maritimes). Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2013, 280-281, pp 139-153. hal-00996919

HAL Id: hal-00996919

https://hal.science/hal-00996919v1

Submitted on 27 May 2014

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.

Étude en laboratoire de l'anisotropie des roches par méthode ultrasonique – Application au gneiss de Valabres (Alpes-Maritimes)

Muriel GASC-BARBIER
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse, CETE du Sud-Ouest

Jérôme WASSERMANN
Département Géosciences et environnement, Université de Cergy-Pontoise

RÉSUMÉ

Parmi les essais non destructifs, l'auscultation des roches par méthode ultrasonore est un moyen couramment utilisé pour caractériser l'état initial d'un spécimen au laboratoire. S'il est courant de faire ces mesures pour caractériser l'état de fracturation d'une roche, ce type de mesure est moins utilisé pour caractériser l'état d'anisotropie. Des essais de compression uniaxiale avec mesure des vitesses des ondes élastiques ont été réalisés sur des gneiss carottés parallèlement et perpendiculairement à leur foliation. L'article montre l'influence de l'anisotropie sur les paramètres physiques et mécaniques de la roche.

Laboratory study of rock anisotropy by ultrasonic method – Application to gneiss from Valabres (Alpes-Maritimes)

ABSTRACT

Ultrasonic auscultation is one of the non-destructive test methods that is commonly used to characterize the initial state of a laboratory sample. This type of laboratory test is commonly used to characterize damage or fracture density of a sample but is less used to characterize anisotropy. Uniaxial tests with elastic (both compressive and shear) wave velocity measurements have been conducted on gneiss. The samples were cored in two orthogonal directions (parallel or perpendicular to the foliation). The paper deals with the influence of anisotropy on physical and mechanical parameters of the rock.

1. INTRODUCTION

Parmi les essais non destructifs, la mesure des vitesses des ondes élastiques (P et S) est un des moyens les plus couramment utilisés en laboratoire pour caractériser globalement l'état de fissuration d'une roche. En effet, les vitesses des ondes ultrasonores sont affectées non seulement par le type de cristaux qu'elles rencontrent (minéralogie de la roche étudiée) mais aussi par leur orientation et leur agencement dans l'espace : présence de vides ou d'eau, etc. L'intérêt principal de ce type de mesure est qu'il est relativement rapide à mettre en place et non destructif.

Le travail présenté ci-après a été réalisé dans le cadre du projet national Stabrock « Impact des changements climatiques sur la stabilité des fronts rocheux : Observation, Expérimentation et Modélisation ». Ce projet s'est étendu sur la période 2005-2009 et prévoyait des expérimentations in-situ, des modélisations du site et la réalisation d'essais de laboratoire, à la fois pour obtenir les paramètres des lois de comportement à utiliser dans les modèles numériques mais aussi pour caractériser la roche de façon plus poussée. Le site et les travaux réalisés dans le cadre du projet ont déjà été présentés (Senfaute et al., 2007 ; Clément, 2008 ; Clément et al., 2008a, 2008b ; Gunzberger, 2004 ; Gunzberger et al., 2005 ; Merrien-Soukatchoff et al., 2005, 2006, 2007).

Deux aspects du comportement des roches ont été étudiés au laboratoire :

– d'une part, le comportement au cisaillement de discontinuités naturelles prélevées sur le site : des trajets de chargement complexes ont été appliqués afin d'obtenir les paramètres de loi de comportement des joints (Gasc-Barbier et Virely, 2013) ;
– d'autre part, une analyse poussée du comportement mécanique a été réalisée : en effet, il s'agit d'un gneiss, donc d'une roche foliée et à forte anisotropie structurale. Il nous a semblé important de caractériser précisément cette anisotropie. Pour cela, des carottes ont été prélevées in situ parallèlement et perpendiculairement à la foliation, ainsi que quelques carottes non orientées. Trois types d'essais ont alors été réalisés :

❶ essais de compression simple avec mesure de vitesse des ondes élastiques en cours d'essais, tous les 5 MPa de chargement ;

❷ essais de compression simple avec mesure de vitesse des ondes élastiques en cours d'essais et enregistrement des émissions acoustiques (EA) sur 4 capteurs ;

❸ essais de compression simple avec enregistrement des événements d'émission acoustique sur 8 capteurs, afin de localiser les sources.

Seules les deux premières séries d'essais sont présentées dans cet article, centré sur les vitesses des ondes élastiques. Les premiers résultats d'émission acoustique ont été présentés par Wassermann et al. (2009a).

2. PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1. Matériel

Avant tout essai mécanique, les vitesses des ondes élastiques sont systématiquement mesurées conformément à la norme NF P94-411 (AFNOR, 2002). Les enregistrements avant essai 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 µs ; 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 ; 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 (transducteur) 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, et permettant également d'enregistrer les signaux émis et reçus pour un traitement ultérieur.

Le chargement mécanique est appliqué par l'intermédiaire d'une presse asservie de type MTS Système, pilotée par un système Testar IIm. Cette presse de rigidité 10^9 N/mm peut servir à la réalisation 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.

Une cellule triaxiale est adaptée à ce système. C'est une cellule haute pression (70 MPa), utilisable sous la presse avec un système hydraulique de confinement de type 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. Les déplacements axial et radial peuvent être mesurés de plusieurs façons : à l'aide d'un LVDT axial et d'une chaînette posée à mi-hauteur de l'échantillon, qui permet d'obtenir les déformations circonférentielles réelles, ou bien par l'utilisation de jauges collées directement sur l'éprouvette. Par la suite, nous verrons que ces deux méthodes ont été utilisées en fonction du type d'essai réalisé.

Avant tout essai mécanique, l'éprouvette est systématiquement pesée, mesurée et les vitesses des ondes sont déterminées conformément à la norme NF P 94-411 (AFNOR, 2002). On reprend dans le **tableau 1** les caractéristiques des carottes qui ont été testées, le type d'essai réalisé et la valeur de la résistance à la compression simple mesurée. Les valeurs des ondes élastiques indiquées correspondent aux vitesses mesurées avant les essais mécaniques sur le bâti dédié à cette mesure (donc sous une charge « de contact » de 15 kN).

2.2. Essais de compression uniaxiale avec uniquement mesure des vitesses

Les éprouvettes R295 et R296 ont été chargées de façon uniaxiale par paliers de 5 MPa. Les essais sont contrôlés en déplacement. Les déplacements sont augmentés avec une vitesse de 0,001 mm/s et tous les 5 MPa d'incrément de contrainte, la déformation axiale est maintenue constante, le temps d'effectuer la mesure des ondes élastiques (environ 3 minutes). Le chargement étant contrôlé en déplacement, chaque palier correspond donc à une phase de relaxation très courte. À l'issue de ces phases, le chargement est ré-augmenté avec la même vitesse. Les mesures des vitesses de propagation des ondes élastiques de compression et cisaillement (P, Sh et Sv) sont réalisées aux extrémités de la carotte.

Seules les déformations axiales sont mesurées, à l'aide des capteurs externes. Le schéma de montage est présenté sur la **figure 1**.

tableau 1
Synthèse des essais réalisés sur les gneiss de Valabres.

Éprouvette	Orientation / foliation	Type d'essai	Mesure des déformations	V_p (m/s)	V_{s1} (m/s)	V_{s2} (m/s)	Résistance à la compression uniaxiale (MPa)
R295	Quelconque	CS + Vp/Vs	globale	3177	1831	1826	56
R296	Quelconque	CS + Vp/Vs	globale	3207	1822	1818	59
R667	Quelconque						80
R297	Parallèle	A (4 capt.) + Vp/Vs	globale				35 (rupture pendant relaxation)
R633	Parallèle	A (8 capt.)	jauges	4788	2803	2825	47
R634	Parallèle	A (8 capt.)	jauges	4934	2797	3043	28
R635	Parallèle	A (8 capt.)	jauges	4990	2343	2785	25
R636	Parallèle	A (4 capt.) + Vp/Vs	globale	5021	3076	2844	84
R637	Perpend.	A (8 capt.)	jauges	2929	2397	2240	108
R638	Perpend.	A (8 capt.)	jauges	3040	2255	2270	89
R639	Perpend.	-		3659	2586	2456	81
R640	Perpend.	A (4 capt.) + Vp/Vs	globale	3657	2486	2404	80

Perpend. = perpendiculaire ; CS = compression simple ; A = Acoustique ; capt. = capteur ;
V_p = vitesse des ondes P ; V_s = vitesse des ondes S

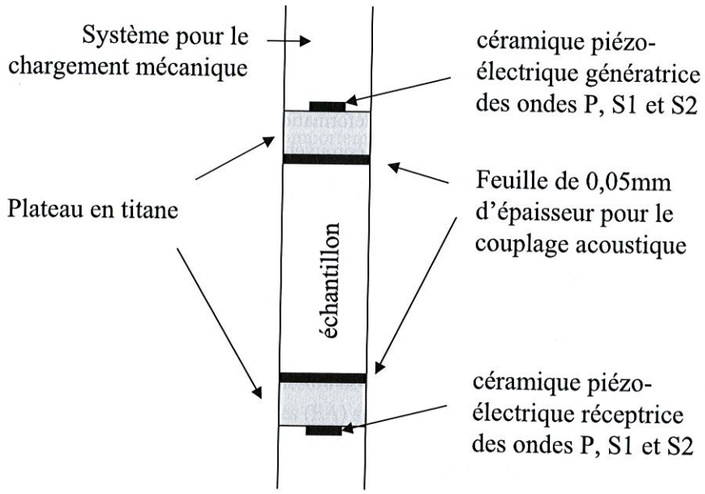


figure 1
Schéma du montage expérimental.

2.3. Essais de compression uniaxiale avec mesure des émissions acoustiques (EA) et mesures de vitesses

Pour ces essais, les éprouvettes ont été équipées d'un collier extensométrique (chaînette composée de deux capteurs extensométriques) et de quatre capteurs acoustiques (TPZ). Les déplacements axiaux sont mesurés au moyen d'un capteur LVDT. Les mesures de déformations sont donc des mesures globales. Les mesures des vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement (P, Sh et Sv) se font toujours aux extrémités de la carotte.

L'essai de compression est mené à une vitesse de déformation longitudinale de $10^{-5}s^{-1}$. Le chemin de chargement consiste à augmenter la contrainte axiale jusqu'à la rupture de l'échantillon. Il comporte des cycles successifs de chargement-relaxation-déchargement **(figure 2)**. Ces cycles et plus précisément les phases de déchargement permettent la détermination des modules élastiques correspondant à une réponse purement élastique du matériau.

La procédure de mesure de vitesse et d'enregistrement des EA suit le protocole utilisé par Wassermann et al. (2009b). Les mesures de vitesses de propagation des ondes élastiques sont réalisées avant le lancement de l'essai proprement dit lorsque le piston est au contact, puis à la fin de chaque phase de relaxation (points a_i, **figure 2**) et lors du rechargement suivant à un niveau de contrainte équivalent (points b_i, **figure 2**) maintenu constant pendant les mesures. Les événements d'EA sont enregistrés au moyen de quatre capteurs piézoélectriques durant tout l'essai mécanique, sauf lors des mesures de vitesses.

Des essais de compression uniaxiale avec 8 capteurs acoustiques ont également été réalisés pendant cette campagne d'essais. Seuls les résultats mécaniques de ces essais sont présentés ici. Wassermann et al. (2013) traitent des mesures acoustiques. La procédure de chargement suivie est la même que celle indiquée sur la **figure 2**. Les déformations sont enregistrées par des jauges directement collées sur l'échantillon, la présence des huit capteurs acoustiques ne permettant pas l'utilisation du collier extensométrique. Les déformations enregistrées sont donc locales et non plus globales.

2.5. Méthode d'analyse des données mécaniques

Les déformations longitudinales (ϵ_L) et les déformations transversales (ϵ_T) de l'éprouvette (plus précisément de sa partie centrale) sont obtenues soit directement lorsqu'on utilise le collier extensométrique et les capteurs externes, soit en moyennant les déformations mesurées par les

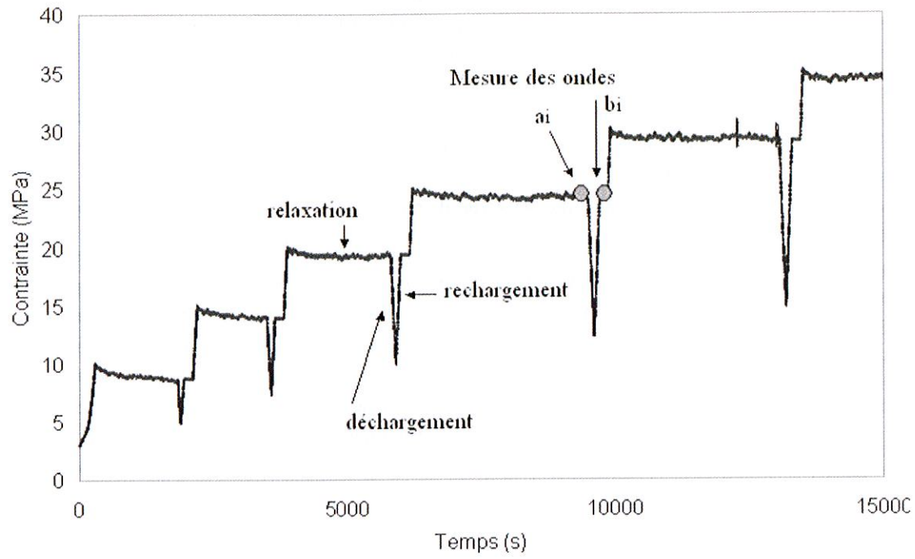


figure 2
Historique du chargement et points de mesure de la vitesse des ondes élastiques (a_i, b_i avec i numéro du cycle) – éprouvette R640.

jauges longitudinales et les jauges transversales respectivement. Les données aberrantes, dues au dysfonctionnement d'une jauge ou à sa rupture, sont préalablement écartées. Les déformations volumiques (ϵ_V) sont déduites des deux précédentes :

$$\epsilon_V = \epsilon_L + 2\epsilon_T \quad (1)$$

Par convention, pour les essais de compression présentés ici, les déformations longitudinales et radiales sont positives en compression. Le comportement mécanique est examiné grâce à la représentation des courbes contrainte-déformation. Celles-ci, lorsqu'elles sont obtenues *via* les capteurs d'extensométrie (LVDT, collier), permettent de visualiser le comportement mécanique même après le pic de contrainte lors de la localisation de la déformation sur un ou plusieurs plan(s) de fracture macroscopique(s). Différentes phases du comportement mécanique peuvent être identifiées **(figure 3)** :

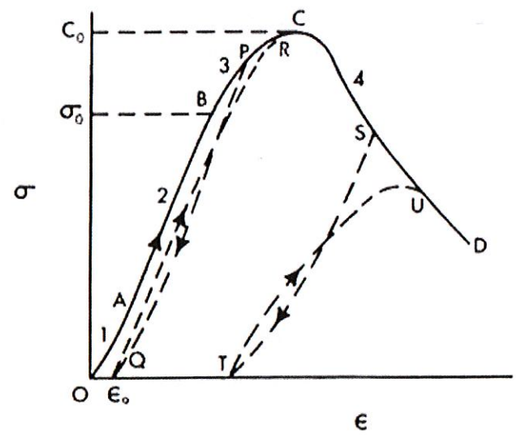


figure 3
Schéma de la courbe contrainte-déformation d'une roche soumise à une compression (Jaeger et Cook, 1979). On distingue les quatre phases du comportement explicitées dans le texte.

– la phase de serrage (1 sur la **figure 3**), 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 ;
– la phase pseudo-élastique (2), où la courbe contrainte-déplacement est linéaire ;
– la phase non-linéaire pré-pic (3), manifestation macroscopique de la coalescence de fissures qui contribueront à former les futures fractures macroscopiques qui scinderont l'échantillon (Goodman, 1980) ;
– la phase post-pic (4), phase de propagation de la fracturation macroscopique.

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., 2009b). Un déchargement ne suivra pas nécessairement le même chemin et des déformations permanentes se manifesteront **(figure 3)**. Les modules de déformation élastique sont déterminés lors d'une réponse purement élastique du matériau, c'est-à-dire durant une phase de déchargement. La phase de relaxation, imposée avant celle-ci, permet de dissiper la déformation viscoélastique. Les propriétés élastiques sont estimées par régression linéaire réalisée le long de chaque phase de déchargement, le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν s'exprimant par :

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_L} \quad \text{et} \quad \nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \qquad (2)$$

Les cycles de chargement – relaxation – déchargement réalisés permettent de séparer les différents comportements et d'identifier clairement le comportement élastique. Les variations des propriétés élastiques (E et ν) déterminées le long des phases de déchargement sont les reflets macroscopiques des processus d'endommagement du matériau sous contrainte.

2.6. Méthode d'analyse des données des vitesses

L'évolution des vitesses pendant l'essai renseigne sur l'évolution de l'état d'endommagement de la roche. En effet, plus l'éprouvette est fissurée, plus le trajet de l'onde élastique est perturbé. Les variations de la vitesse des ondes élastiques peuvent traduire un serrage ou une ouverture des fissures. Ainsi, aux phases mécaniques décrites plus haut, s'ajoutent les caractéristiques des vitesses des ondes :

– durant la phase de serrage, correspondant microscopiquement à la fermeture de fissures préexistantes, la vitesse des ondes de compression augmente ;
– au cours de la phase pseudo-élastique, la courbe contrainte-déplacement est linéaire et les vitesses évoluent peu en général ;
– la phase non-linéaire pré-pic est généralement marquée par une diminution des vitesses ;
– enfin, pendant la phase post-pic, les vitesses diminuent fortement.

L'enregistrement des valeurs des vitesses pendant l'essai permet également de calculer des paramètres élastiques dynamiques de la roche. La loi de Hooke permet d'écrire :

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

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 (module d'Young statique) sera noté E_{stat}.

Enfin, 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 des gneiss de Valabres.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La **figure 4** présente la courbe contrainte/déformation et l'évolution des vitesses obtenues pour l'essai sans mesure acoustique (R 295 d'orientation quelconque). La courbe contrainte-déformation et l'évolution des vitesses obtenue pour l'essai avec mesure acoustique à 4 capteurs (R640, éprouvette carottée perpendiculairement au plan de foliation) sont présentées sur la **figure 5**. La **figure 6** montre deux courbes contrainte-déformation obtenues lors des essais sur éprouvettes instrumentées par 8 capteurs acoustiques (R633, éprouvette carottée parallèlement à la foliation, et R637, éprouvette carottée perpendiculairement à la foliation).

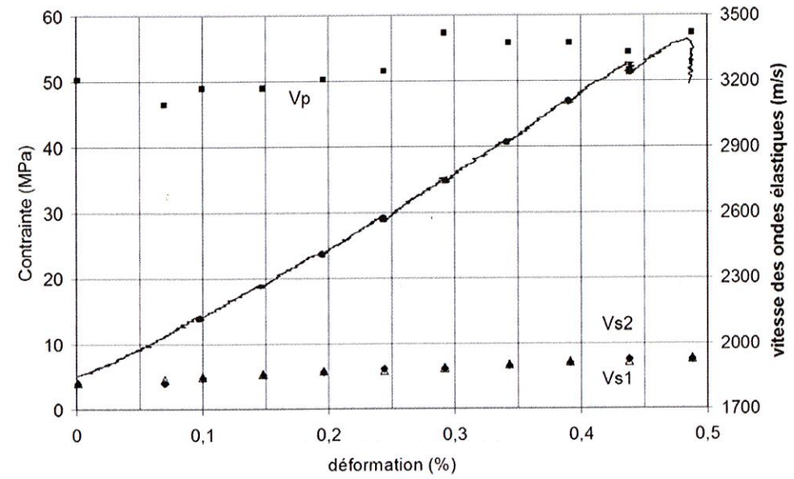


figure 4
Courbe contrainte-déformation caractéristique des essais uniaxiaux avec mesure des seules vitesses. L'orientation de la carotte testée (R 295) est quelconque.

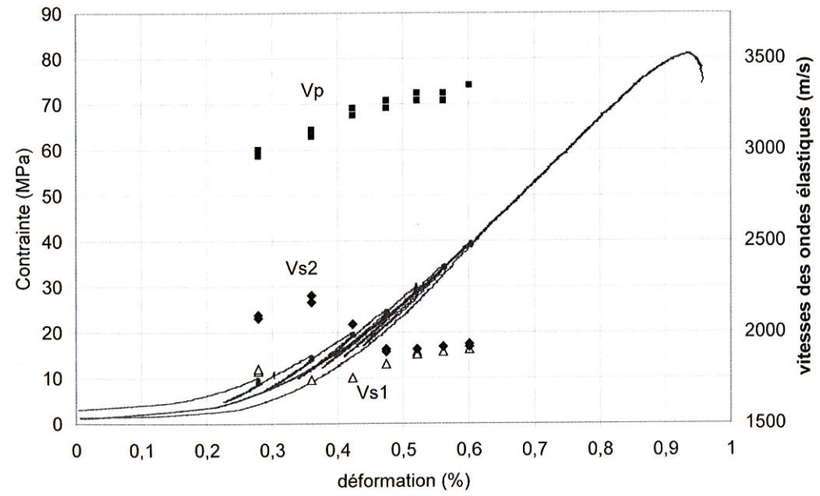


figure 5
Courbe contrainte-déformation caractéristique des essais uniaxiaux avec mesures des vitesses et enregistrement des événements d'EA sur 4 capteurs. L'éprouvette (R 640) est carottée perpendiculairement au plan de foliation.

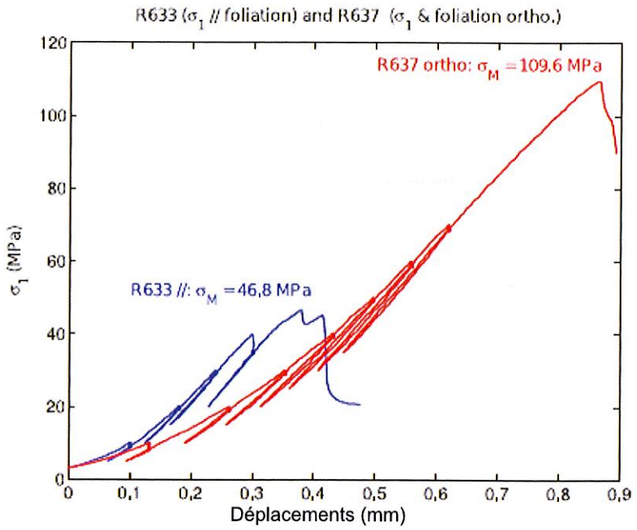


figure 6
Courbes contrainte-déplacement issues des compressions uniaxiales des éprouvettes R633 (en bleu, foliation sub-parallèle à σ_1) et R637 (en rouge, foliation sub-orthogonale à σ_1), d'après Wassermann et al. (2009a).

Plusieurs types d'information peuvent être tirés de la série d'essais réalisée. Nous allons donc reprendre successivement les résultats obtenus concernant :

– la caractérisation de l'anisotropie physique de la roche,
– l'évolution des modules statiques,
– l'évolution des modules dynamiques,
– l'évolution des vitesses des ondes élastiques.

3.1. Caractérisation de l'anisotropie physique de la roche via les mesures mécaniques

Du point de vue du comportement général du gneiss, les quatre phases du comportement mécanique décrites précédemment (2.5) sont identifiables sur l'éprouvette R633 **(figure 6)**, ainsi que sur la **figure 5** (non commentée dans ce qui suit) : la première phase de serrage jusqu'à environ 20 MPa, la phase pseudo-élastique linéaire jusqu'à environ 40 MPa puis la troisième phase non linéaire pré-pic et enfin la phase post-pic de propagation de la fracturation macroscopique au-delà du pic de contrainte. Néanmoins ces phases peuvent être difficiles à distinguer dans d'autres cas comme pour l'éprouvette R295 **(figure 4)** ou l'éprouvette R637 **(figure 6)**. En effet, la phase pseudo-élastique linéaire n'y est pas clairement visible, la phase de serrage semblant perdurer. Notons également que la rupture étant particulièrement brutale pour ces essais, la phase de propagation de la fracturation macroscopique n'a pu être suivie.

Les courbes contrainte-déformation de l'essai parallèle (*II*) à la foliation et de l'essai perpendiculaire (T) sont présentées sur la **figure 7**. L'augmentation relative de volume de l'éprouvette (la pente de la courbe σ_1 versus ϵ_v change de signe) ou dilatance, est clairement observée pour l'essai *II* (à gauche, courbe verte). Cette augmentation de volume est souvent attribuée à l'ouverture de fissures extensives (Mode I) dont la plus grande dimension est sub-parallèle à la contrainte principale majeure σ_1 (Jaeger et Cook, 1979). La dilatance tarde à se produire durant l'essai T (à droite, courbe verte). Dans les deux cas (*II* et *T*), tous les cycles de chargement-déchargement sont linéaires et réversibles avec une hystérésis négligeable, traduisant des processus élastiques de déformation.

La résistance à la rupture dépend clairement de l'orientation de la foliation du gneiss par rapport à la contrainte axiale σ_1 (**figure 6** et **tableau 1**) ; en effet, la contrainte maximale atteinte lors de la

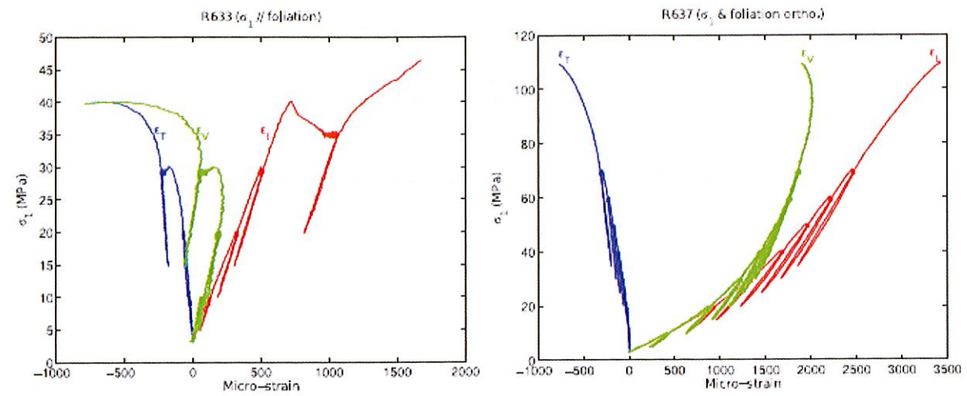


figure 7
Courbes contrainte-déformation issues des compressions uniaxiales de R633 (à gauche, foliation sub-parallèle à σ_1) et R637 (à droite, foliation sub-orthogonale à σ_1). Les déformations longitudinales (ϵ_L) sont en rouge, les déformation transversales (ϵ_T) en bleu, et les déformations volumiques (ϵ_V) en vert, d'après Wassermann et al. (2009a).

compression de l'échantillon à la foliation sub-parallèle à l'axe de chargement (R633, 46,8 MPa) est bien inférieure à celle atteinte lors de la compression de l'échantillon à la foliation sub-orthogonale à σ_1 (R637, 109,6 MPa). Plus précisément, en reprenant l'ensemble des valeurs de résistance à la compression simple mesurées sur les gneiss de Valabres en fonction de l'orientation de l'axe des éprouvettes par rapport à la foliation, on retrouve :

– éprouvettes non orientées : 56 à 59 MPa avec une valeur à 80 MPa ;
– éprouvettes parallèles à la foliation : 25 à 47 MPa avec une valeur à 84 MPa ;
– éprouvettes perpendiculaires à la foliation : 81 à 108 MPa.

Ainsi, à part pour la carotte R636, on a bien une anisotropie marquée de la valeur de la résistance à la compression simple. Les carottes *II* ont une résistance à la compression simple environ 3 fois inférieure à celle des carottes T. Les carottes non orientées se situent entre les deux. La **figure 8**

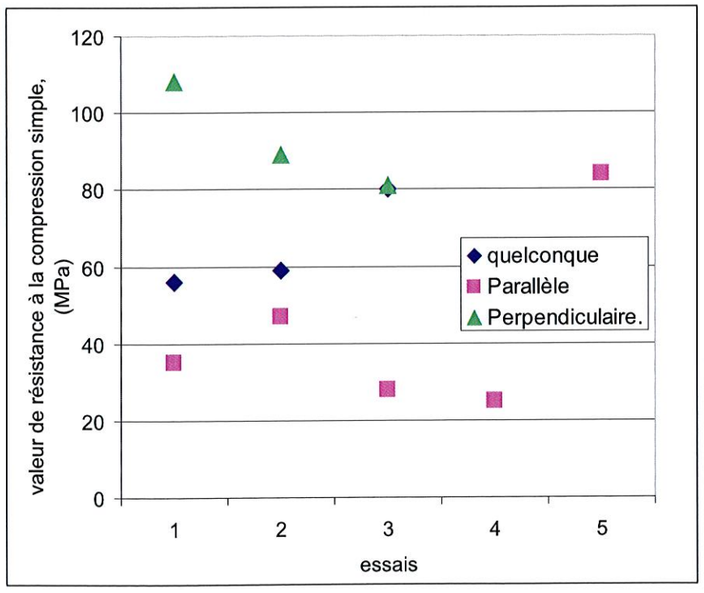


figure 8
Valeurs de résistance à la compression simple en fonction de l'orientation de la foliation de la roche par rapport à l'axe de la carotte. On note que les valeurs les plus élevées sont retrouvées pour les carottes perpendiculaires à la foliation alors que les valeurs les plus faibles (rapport de 3 environ) sont obtenues sur les carottes parallèles à la foliation. Les carottes non orientées se situent dans la plage intermédiaire.

illustre cela en présentant les valeurs de résistance à la compression simple mesurées en fonction de l'orientation de la carotte par rapport à la foliation de la roche.

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

La **figure 9** reprend les valeurs initiales des ondes élastiques mesurées conformément à la norme NF P94-411. On note que les valeurs les plus élevées sont retrouvées pour les éprouvettes *II* alors que les valeurs les plus faibles sont obtenues sur les éprouvettes T. Les carottes non orientées se situent dans la plage intermédiaire. 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 **(figure 4)**, alors que, pour des éprouvettes orientées, on arrive bien à les différencier **(figure 5)** ;
– en fonction de l'orientation de la foliation par rapport à l'axe de la carotte, on observe une différence entre les vitesses de cisaillement 1 et 2 : dans le cas d'une éprouvette carottée perpendiculairement à la foliation (R640 - **figure 5**), S2 est plus rapide que S1, alors que, dans le cas d'une éprouvette carottée parallèlement à la foliation, S1 est plus rapide que S2.

La comparaison des temps d'arrivée en fonction de l'orientation de la carotte par rapport à l'axe de 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.

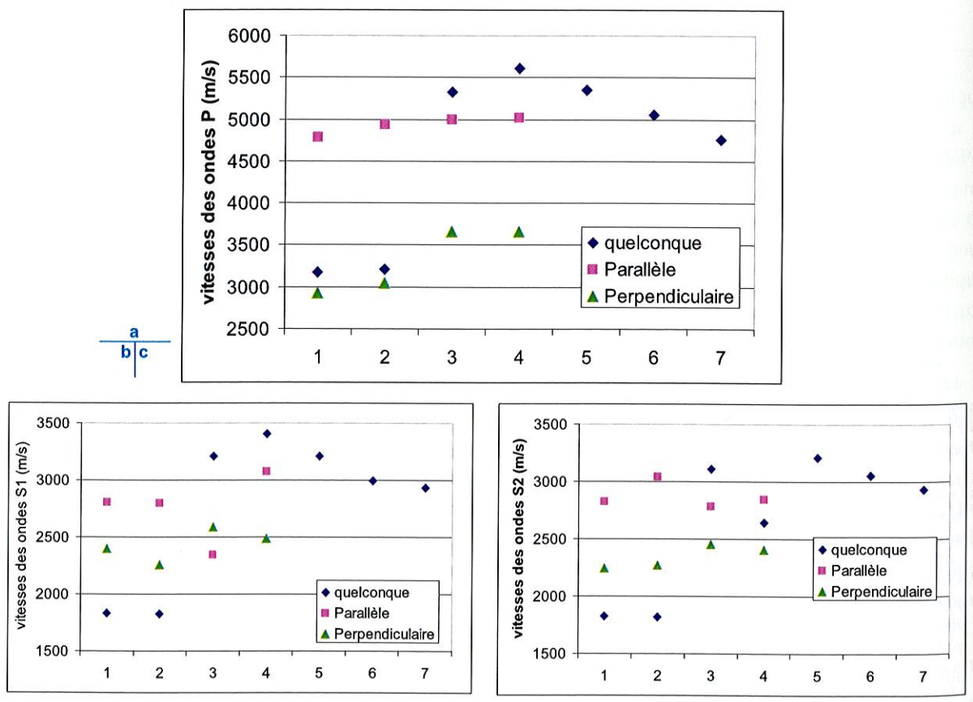


figure 9
Vitesses des ondes P (a), S1 (b) et S2 (c) en fonction de l'orientation de la foliation de la roche par rapport à l'axe de la carotte.

3.3. Évolution des modules statiques

Les modules d'Young statiques sont les modules estimés à partir des courbes contrainte-déformation. Comme expliqué précédemment, les modules sont déterminés lors de la phase de déchargement.

La **figure 10** regroupe ces estimations. Les figurés « pleins » concernent les éprouvettes parallèles à la foliation et les figurés « vides » les éprouvettes perpendiculaires à celle-ci. Il apparaît que les modules des échantillons parallèles à la foliation sont légèrement plus élevés que ceux des échantillons perpendiculaires, ce qui traduit bien un comportement plus raide et plus fragile, comme observé sur les valeurs de résistance à la compression simple.

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 et R635 d'une part et R297 et R636 de l'autre, pour les éprouvettes *II*, et R637 et R638 contre R640, pour les éprouvettes T (voir aussi le **tableau 1**, récapitulant l'ensemble des essais).

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 (non représenté ici) 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 11)**.

3.4. Évolution des vitesses des ondes élastiques au cours du chargement

La **figure 12** montre l'évolution des ondes élastiques en fonction de la contrainte appliquée. Des variations de vitesses des ondes élastiques sont observées avant la rupture, mais ces vitesses restent cependant relativement faibles. Pour les éprouvettes *II*, cette variation est très faible, alors qu'elle semble plus marquée sur les éprouvettes T : sur l'éprouvette R640, on peut noter une augmentation non négligeable de la vitesse des ondes P, concomitante avec une diminution des ondes S (surtout S2). Cette éprouvette ayant été carottée perpendiculairement à la foliation, la compression simple provoque donc une fermeture des joints de foliation induisant ces variations de vitesses d'onde P.

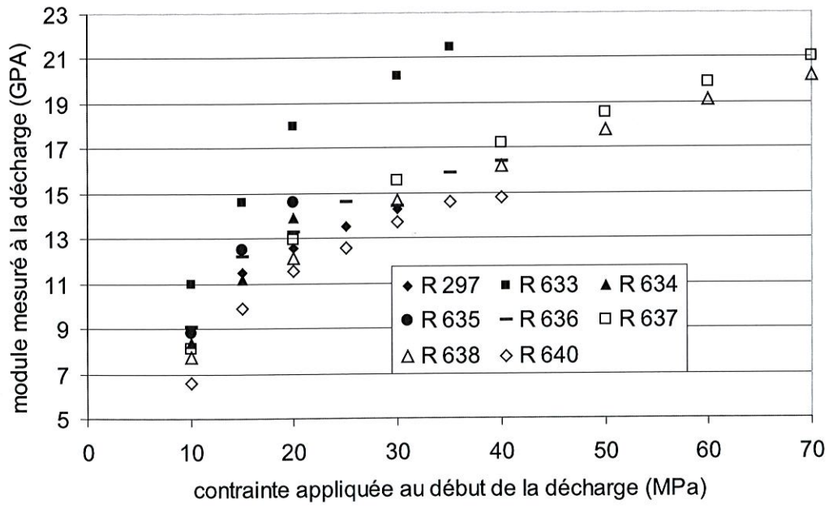


figure 10
Valeurs des modules statiques mesurés à la décharge en gigapascals : en figuré « plein » les éprouvettes carottées parallèlement à la foliation et en figuré « vide » les éprouvettes préparées perpendiculairement.

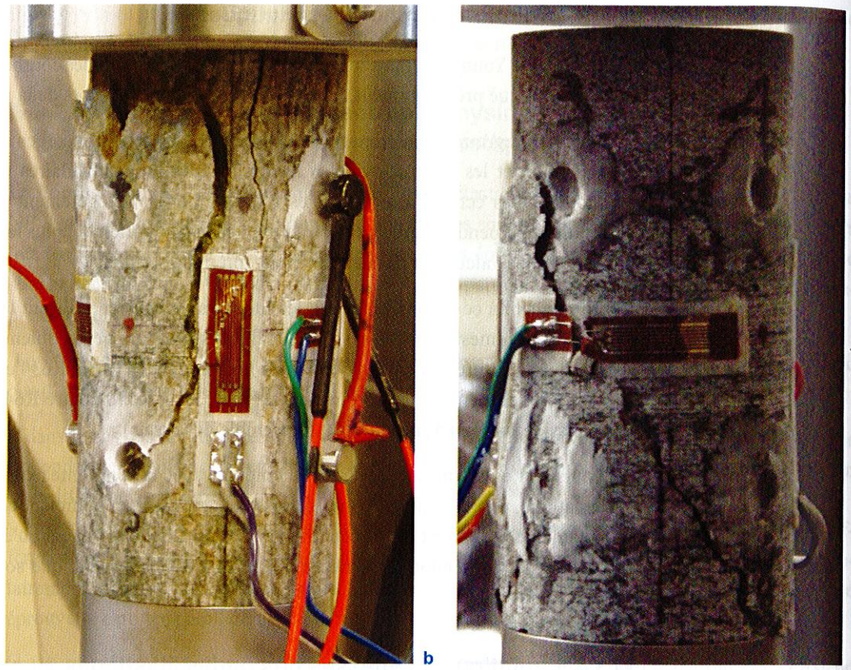
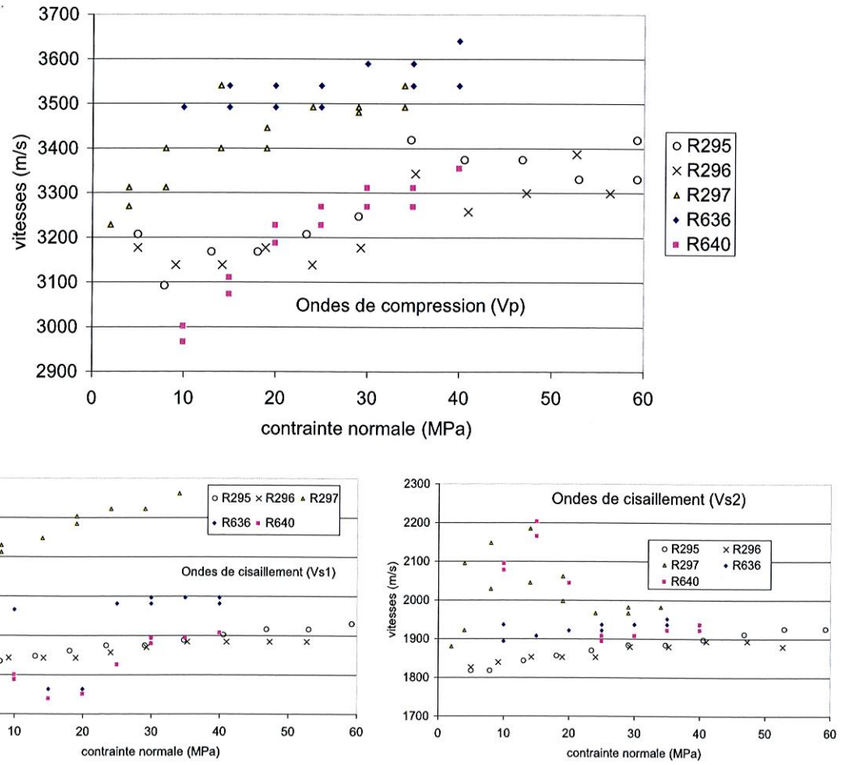


figure 11
Photos de 2 éprouvettes après essais : a - R633, carottée parallèlement à la foliation ; b - R637 carottée perpendiculairement.

figure 12
Évolution des ondes élastiques en fonction de la contrainte appliquée.



3.5. Évolution des modules dynamiques

Les modules dynamiques sont les modules calculés à partir des valeurs des vitesses des ondes élastiques. La **figure 13** présente les valeurs calculées pour l'ensemble des essais.

Les valeurs des modules dynamiques augmentent légèrement au cours de l'essai, 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 (points a_i sur la **figure 2**) et pendant la recharge (points $_{bi}$ sur la **figure 2**).

De plus, comme pour les modules statiques, les modules dynamiques mesurés sur les éprouvettes *II* sont plus importants que ceux mesurés sur les éprouvettes T.

Les variations des modules dynamiques semblent plus importantes dans le cas des échantillons T (figurés vides sur la **figure 13** ; pour l'éprouvette R640, l'augmentation du module atteint plus de 20 %) que pour ceux préparés parallèlement à la foliation (figurés pleins sur la **figure 13**, l'augmentation est inférieure à 10%).

4. DISCUSSION

4.1. Comparaison des valeurs des modules statiques et dynamiques

Comme nous l'avons noté plus haut, les modules dynamiques calculés sont plus importants que les modules statiques mesurés. On observe un facteur 2 à 3 environ, suivant les éprouvettes considérées et suivant où l'on se trouve dans le chemin de chargement. Ces ordres de grandeurs sont comparables à ce qui a été donné par d'autres auteurs (Sarout, 2006).

Au cours du chargement, la variation des modules statiques est plus importante que celle des modules dynamiques, puisque les premiers vont quasiment jusqu'à doubler alors que les modules dynamiques n'augmentent « que » de 10 à 20%.

4.2. Comparaison du comportement mécanique en fonction de l'orientation de la carotte

› 4.2.1 Résistance à la compression simple

Du point de vue de la résistance à la compression simple, on note que les carottes *II* ont une valeur de résistance à la compression simple quasiment deux fois plus faible que celles préparées

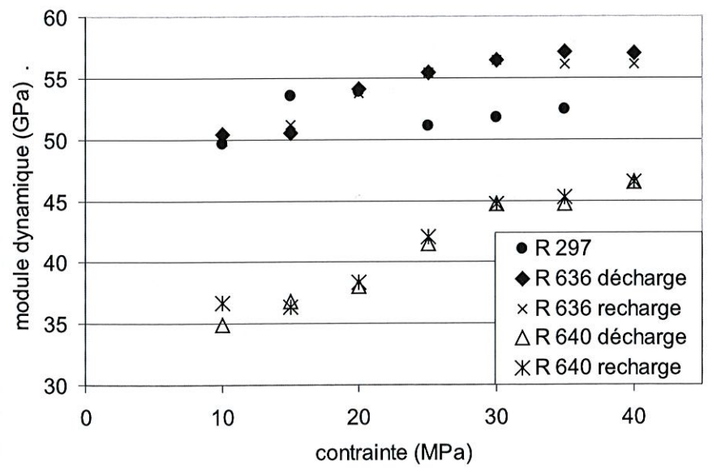


figure 13
Valeurs des modules dynamiques calculés (GPa). Les figurés pleins correspondent aux éprouvettes préparées parallèlement à la foliation, les figurés vides aux éprouvettes préparées perpendiculairement à la foliation et les croix aux mesures effectuées à la recharge.

perpendiculairement à la foliation. La rupture est brutale pour les carottes *II* et elle se produit selon des plans sub-parallèles, c'est à dire, le long des plans de foliation. La rupture est moins brutale pour les carottes T.

› 4.2.2 Modules

Les modules statiques mesurés sont très proches les uns des autres, quelle que soit l'orientation de la carotte. Il semble néanmoins que les modules des éprouvettes *II* soient très légèrement supérieurs, ce qui pourrait être interprété par une raideur supplémentaire du matériau lié à sa structure foliée (raideur dans le plan de foliation).

Les modules statiques évoluent de manière très semblable au cours du chargement, indépendamment de l'orientation de la carotte. Les modules dynamiques, eux, ne se comportement pas de façon homogène : leur augmentation est plus importante dans le cas des éprouvettes T que pour les éprouvettes *II*.

4.3. Degré d'anisotropie du matériau

Les résultats présentés ici corroborent en partie seulement ceux obtenus par Serratrice (2003) et présentés par Gunzberger (2004) sur cinq éprouvettes du même matériau. En effet, il était indiqué que l'anisotropie est moins marquée en résistance qu'en déformation, et que le module est maximum pour la foliation parallèle à l'axe de l'éprouvette et minimum pour la foliation perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette, ce que l'on observe aussi. Par contre, la résistance minimale est obtenue pour 45 degrés d'orientation entre l'axe de l'éprouvette et la carotte, alors que, dans notre étude, la résistance minimale est obtenue pour les carottes parallèles à la foliation. L'orientation à 45 degrés n'a pas été étudiée ici, mais les résultats obtenus sur une orientation dite « quelconque » car non estimée s'en rapprochent. La résistance mesurée est alors intermédiaire.

Ainsi du fait de leur anisotropie marquée, les gneiss de Valabres ne devraient pas être caractérisés par un seul module et une seule valeur de résistance à la compression simple. La loi de Hooke qui permet de décrire le comportement d'un matériau transversalement isotrope a 5 paramètres : deux modules d'Young (E_{paral} et E_{perp}), deux coefficients de Poisson (ν_{paral} et ν_{perp}) et un module de cisaillement G. Serratrice (2003) et Amadei (1996) indiquent que le module apparent s'écrit alors :

$$\frac{1}{E_{app}} = \frac{1}{E_{perp}} sin^4\theta + \left(\frac{1}{G} - 2\frac{\nu_{perp}}{E_{perp}}\right) cos^2\theta\, sin^2\theta + \frac{1}{E_{paral}} cos^4\theta$$

où θ est l'angle entre la foliation et l'axe d'application de la charge (éprouvette *II*, q = 0 degré, éprouvette T, θ = 90 degrés). Ainsi, si l'on utilise les valeurs obtenues pour un chargement uniaxial de 25 MPa et sur les éprouvettes R636 et R640, on peut proposer E_{paral} = 14,6 GPa et E_{perp} = 12,5 GPa, ce qui permettrait alors de calculer des E_{app} pour différentes orientations.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'enregistrement des vitesses des ondes élastiques en laboratoire permet de caractériser de façon non destructive l'anisotropie de la roche. Couplées aux essais mécaniques, ces mesures permettent de mieux appréhender l'anisotropie de la roche. En effet, comme nous l'avons vu, les différents paramètres mesurés ne répondent pas de la même façon en fonction de l'orientation de l'axe de la carotte par rapport à la foliation naturelle de la roche. Les valeurs de résistance à la compression simple dépendent de l'orientation de la carotte, ainsi que les variations en cours d'essais des modules dynamiques. Au contraire, les variations relatives des modules statiques semblent relativement indépendantes de l'orientation. Enfin, il semble important de vérifier les observations faites sur les vitesses relatives des ondes de cisaillement S1 et S2. En effet, on a observé que, dans le cas d'une orientation quelconque, S1 et S2 sont quasiment identiques alors que, pour des éprouvettes carottées perpendiculairement à la foliation, S2 est plus rapide que S1 et, pour des éprouvettes carottées parallèlement à la foliation, S1 est plus rapide que S2. Cette observation est intéressante et pourrait contribuer à caractériser l'anisotropie in situ des roches.

Le travail présenté ici n'est qu'une petite partie d'un projet beaucoup plus important. Du point de vue expérimental, les premiers résultats concernant la localisation des sources d'événements d'émission acoustique (EA), donc la localisation de l'endommagement microscopique proprement dit, ont été présentés par Wassermann et al. (2009). Enfin, les paramètres mécaniques et les résultats en termes d'anisotropie du matériau ont pu être utilisés pour la modélisation du site par les participants au projet Stabrock.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre du projet PGCU Stabrock. Il a donc bénéficié des réflexions des différents participants au projet et tout particulièrement de Véronique Merrien-Soukatchoff.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Afnor (2002). Norme NF P94-411 : Roches. Détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en laboratoire.

Amadei B. (1996). Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abstr.* Vol. 33, n°3, pp 293-325.

Clément C. (2008). *Auscultation d'un versant rocheux soumis aux sollicitations thermiques naturelles. Cas des Rochers de Valabres (Alpes Maritimes).* Thèse de l'INPL, Nancy, 175 pages + Annexes.

Clément C., Merrien-Soukatchoff V., Dünner C., Gunzberger Y. (2008a). Stress measurement by overcoring at shallow depth in a rock slope: scattering of input data and results, *Rock Mechanics and Rock Engineering.* Published on line 12-2008.

Clément C, Gunzberger Y., Merrien-Soukatchoff V., Dünner C. (2008b). Monitoring of natural thermal strains using hollow cylinder strain cells: the case of a large rock slope prone to rockfalls. *10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, pp. 1143-1149.

Gasc-Barbier M., Virely D. (2013). New shear cell to study the shear behaviour of rocks *in prep. pour Geotechnical Testing Journal.*

Goodman R.E. (1980). *Introduction to rock mechanics.* John Wiley & sons. New York

Gunzberger Y. (2004). *Rôle de la thermique dans la prédisposition, la préparation et le déclenchement des mouvements de versants complexes – exemple des rochers de Valabres (Alpes maritimes).* Thèse de l'INPL, Nancy, 174 pages + annexes.

Gunzberger Y., Merrien-Soukatchoff V., Gugliemi Y. (2005). Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: Case study of the Rochers de Valabres slope (France), *Int. J. Rock Mech. Min. Sc,* vol 42, n°3, pp. 331-349.

Jaeger J.C., Cook N.G. (1979). *Fundamentals of rocks mechanics.* Chapman et Hall.

Merrien-Soukatchoff V., Clément C., Senfaute G., Gunzberger Y. (2005). Monitoring of a potential rockfall zone: The case of "Rochers de Valabres" site, *International Conference on Landslide Risk Management,* Vancouver.

Merrien-Soukatchoff V., Sausse J., Dünner C. (2006). Influence of topographic roughness on the stress state in a sloped rock-mass, *Proc. EUROCK 2006*, Liège.

Merrien-Soukatchoff V., Clément C., Gunzberger Y., Dünner C. (2007). Thermal effects on rock slopes: case study of the "Rochers de Valabres" slope (France), *ISRM 2007* Lisbon.

Sarout J. (2006). *Propriétés physiques et anisotropie des roches argileuses : modélisation micromécanique et expériences triaxiales.* Thèse de l'université Paris XI, Orsay, 204 pages.

Senfaute G., Darve F., Dünner C., Gasc M., Gugliemi Y., Laouafa F., Lançon H., J. Mudry J., Pouya A., Soukatchoff V. (2007). Impact of climate change on rock slope stability: field observation, monitoring and modelling. Ile of Wight *International Conference on landslide and climate change*, UK.

Serratrice J.F. (2003). Site de Valabres, blocs de gneiss, Essais de laboratoire. *dossier 18082.01.643.* CETE Méditerranée, LRPC d'Aix-en-Provence.

Wassermann J., Gasc-Barbier M., Senfaute G. (2009a). Damage localization during uniaxial compressions of anisotropic rocks. Geophysical Research Abstracts, vol 11, *EGU (European Geoscience Union).*

Wassermann J., Senfaute G., Amitrano D., Homand F. (2009b). 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.

Wassermann J., Gasc-Barbier M., Senfaute G. (2013). Damage localization during compressions of anisotropic rocks. *en préparation pour Geophys. J. Int.*