



HAL
open science

Propriétés des terrains briovériens du bassin rennais

Véronique Merrien-Soukatchoff, Damien Rangeard

► **To cite this version:**

Véronique Merrien-Soukatchoff, Damien Rangeard. Propriétés des terrains briovériens du bassin rennais. Revue française de Géotechnique, 2022, 171, 10.1051/geotech/2022002 . hal-03640014

HAL Id: hal-03640014

<https://hal.science/hal-03640014>

Submitted on 2 Jan 2023

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.

Propriétés des terrains briovériens du bassin rennais

Véronique Merrien-Soukatchoff, cnam

Laboratoire Géomatique & Foncier (EA 4630), Conservatoire National des Arts et Métiers, Case courrier EPN01-C, 2, rue Conté, 75141 Paris cedex 03.

Damien Rangeard, INSA Rennes

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA de Rennes, 20 avenue des buttes de Coësmes, 35700 Rennes.

Résumé :

Le bassin rennais est majoritairement constitué de terrains briovériens, schisteux, fracturés et présentant des degrés d'altération variables. Le Briovérien peut être recouvert par des formations superficielles et quelques intrusions magmatiques sont injectées dans les terrains plus anciens. Les matériaux rencontrés ont une faible résistance mécanique qui les classe en SIRT (Sols indurés et Roches tendres).

Pendant plusieurs années, des essais ont été réalisés sur les matériaux de l'agglomération rennaise, principalement datés du Briovérien, pour définir leurs caractéristiques et mieux comprendre le comportement des ouvrages géotechniques réalisés dans le sous-sol rennais. L'excavation de la ligne b du métro a notamment permis d'avoir des échantillons de l'Ouest à l'Est de la ville de Rennes. Compte tenu du comportement intermédiaire entre le sol et la roche des terrains, des procédures spécifiques d'essais sur la matrice rocheuse et les discontinuités ont été développées.

La matrice rocheuse, anisotrope, a été caractérisée par des mesures de vitesse d'ondes et des essais de résistance à la compression. Cependant compte tenu de l'impossibilité de carotter le matériau, les essais ont été réalisés sur des blocs parallélépipédiques taillés à la main. En complément, pour évaluer le caractère « friable » de ces SIRT, la résistance à l'usure a été caractérisée à partir d'essais de broyabilité et micro-Deval modifiés. L'ensemble des essais montre des variations fonction du faciès, mais aussi une forte influence de l'altération et de la teneur en eau.

Les discontinuités ont été testées avec une boîte de Casagrande modifiée. Ces essais ont aussi montré la forte influence du type de matériau (siltites, grès grossier à fin...) et du degré d'humidité des joints sur les caractéristiques de cisaillement.

Des différences de comportement entre faciès géologiques ont donc été mises en évidence. L'histoire géologique et, en particulier, les alternances de progradation et de rétrogradation lors de la sédimentation au Briovérien, conditionne les propriétés de la matrice rocheuse, des discontinuités et donc du massif rocheux.

Abstract

The Rennes Basin is mainly made up of Brioverian, schistose, fractured rock the weathering of which is variable. The Brioverian can be covered by superficial formations and some magmatic intrusions are injected into the older formations. The materials have a low mechanical resistance which classifies them as HSSR (hard soils soft rocks).

For several years, tests were carried out on ground specimens, mainly Brioverian, from the Rennes city area. Their mechanical properties were studied, to better understand the behaviour of geotechnical structures in the subsoil of Rennes. The excavation of line b of the metro provided samples from the west to the east part of the Rennes City. Because of the midway behaviour between soil and rock of the material, specific test procedures on the rock matrix and the discontinuities have been developed.

The rocky, anisotropic matrix was characterised by wave velocity measurements and uniaxial compressive strength test. However, because of the impracticality of coring the material, the tests were carried out on parallelepipedal blocks, hand cut. In addition, to assess the "crumbliness" of these HSSR, the wear resistance was characterised from modified grindability and micro-Deval tests. All the tests show results depending on the facies but also a strong influence of weathering and water content.

The discontinuities were tested with a modified Casagrande box. These tests also demonstrated the strong influence on the shear characteristics of the type of material (siltstone, fine to coarse sandstone, etc.) and of the degree of moisture in the joints.

Differences in behaviour between geological facies have therefore been highlighted. The geological history and, specifically the alternations of progradation and retrogradation during Brioverian sedimentation, conditions the properties of the rock matrix, of the discontinuities and therefore of the rock mass.

Mots clés

Rennes, Briovérien, anisotropie, propriétés mécaniques, SIRT

Keywords

Rennes, Brioverian, anisotropy, mechanical properties, HSSR

Introduction

Les travaux récents dans l'agglomération rennaise, notamment les excavations pour la ligne 2 du métro ont permis d'acquérir des connaissances sur les caractéristiques des formations rencontrées dans cette région.

Les schistes briovériens sont les principaux terrains rencontrés dans le bassin rennais. Ils sont fracturés et présentent des degrés d'altération variables. Les matériaux qui les composent ont de faibles résistances et un comportement intermédiaire entre un sol et une roche qui les classe en SIRT (Sols indurés et roches tendres). Ils ont également des caractéristiques variables, du fait de leur histoire géologique et tectonique. Les propriétés des terrains impactent le comportement des ouvrages. Ce papier se propose essentiellement de faire la synthèse des essais de laboratoire réalisés sur les matériaux du sous-sol rennais, le comportement à l'échelle de l'ouvrage est plus spécifiquement abordé dans Le Cor, Merrien-Soukatchoff et al. (2014).

La première partie résume l'histoire géologique de la région rennaise, puis quelques indications sont données sur la minéralogie avant d'aborder les propriétés mécaniques des terrains (matrice, discontinuités). En dernière partie, l'impact à l'échelle du massif rocheux est abordé.

Géologie de l'agglomération rennaise

Les terrains du bassin rennais (Figure 1) se sont principalement déposés à la fin de l'orogénèse cadomienne, pendant la période appelée Briovérien. Ils ont ensuite été affectés (plissement et faible métamorphisme) par l'orogénèse hercynienne, puis altérés. Ci-dessous, nous détaillons leur histoire et précisons les autres formations également rencontrées à l'affleurement (cf. Figure 2) : formations superficielles et intrusions magmatiques.

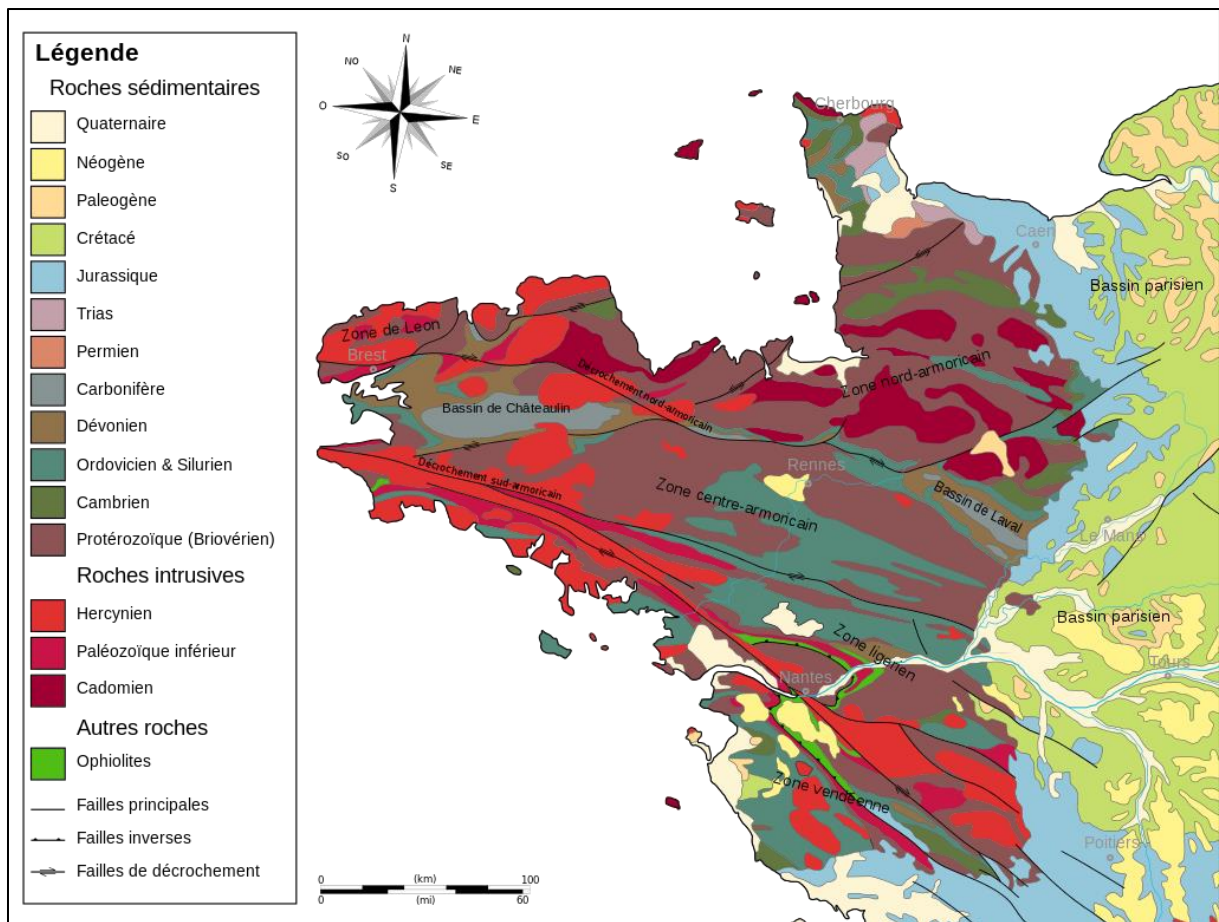
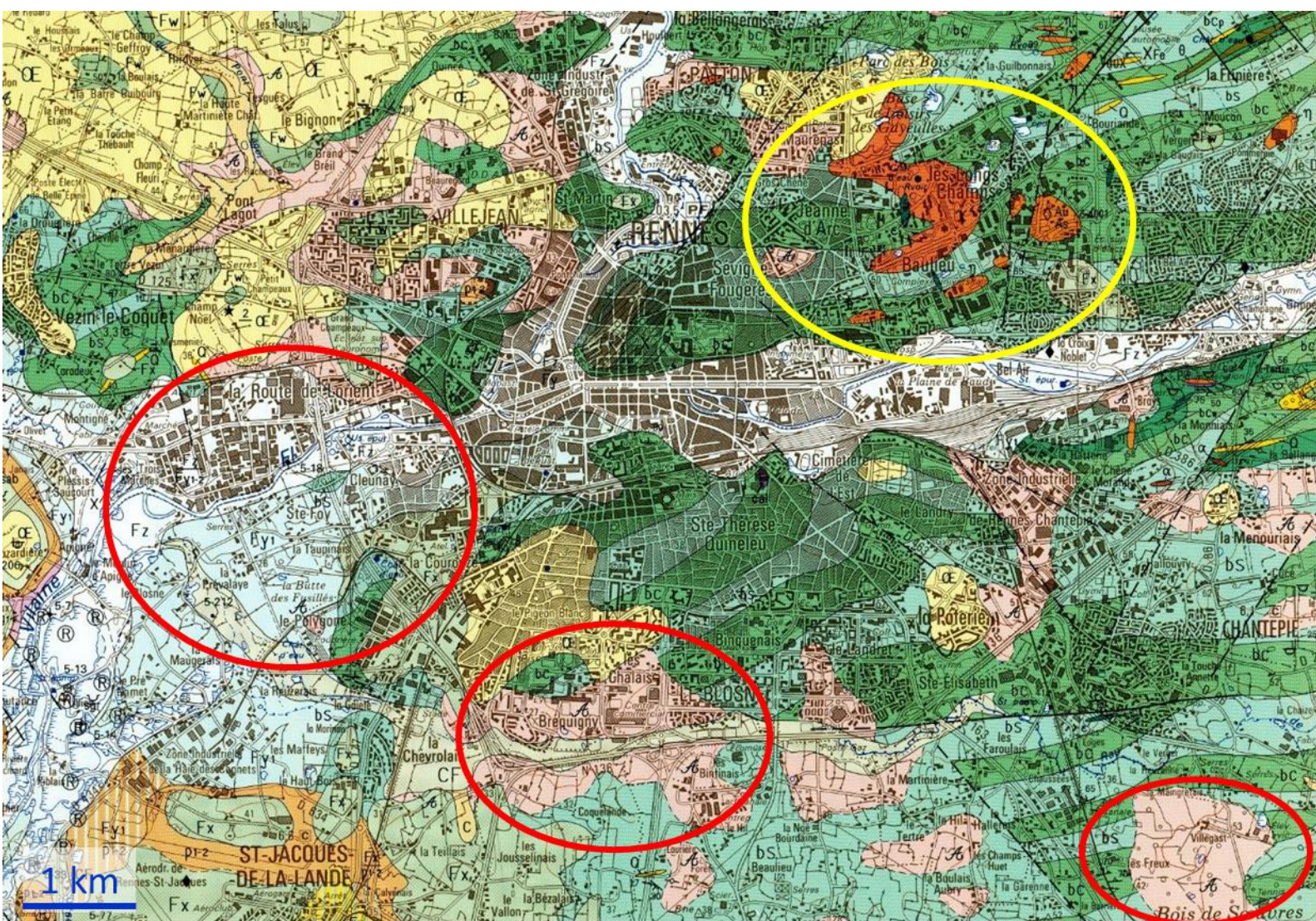
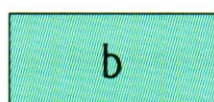


Figure 1 : Carte géologique Massif armoricain (1996, modifié d'après Debelmas 1974).

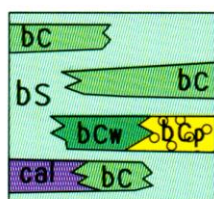
Figure 1: Geological map of the Armorican Massif (1996, modified after Debelmas 1974).



PROTÉROZOÏQUE TERMINAL À PALÉOZOÏQUE BASAL (BRIOVÉRIEN)



Briovérien indifférencié



bs - Alternances silto-gréseuses jaune verdâtre, tendres

bc - Alternances silto-wackeuses dures

bcw - Wackes dominantes

bcP - Microconglomérats à éléments de phtanite

cal - Grès et siltites noirs carbonatés, laves acides localement

Figure 2 : Carte géologique de l'agglomération rennaise (extrait de la carte imprimée au 1/50000, disponible sur <https://infoterre.brgm.fr/>) échelle donnée par la barre 1 km. Les intrusions magmatiques sont cerclées de jaune, tandis que les cercles rouges indiquent les formations superficielles

Figure 2: Geological map of the Rennes conurbation (extract from the 1/50000 printed map, available on <https://infoterre.brgm.fr/>) scale given by the 1 km bar. Magmatic intrusions are circled in yellow, while red circles indicate superficial geology

Mode de mise en place des sédiments du briovérien

Les sédiments briovériens de la région rennaise se sont déposés à la fin du Précambrien entre -610 Ma et -530 Ma. La formation est composée de sédiments initiaux détritiques terrigènes, volcano-détritiques, mais aussi de carbonates. La mise en place des sédiments s'est faite en environnement marin (Dabard, 1990) lors de cycles de transgression et de régression. La formation est composée de séquences sédimentaires caractéristiques des variations du niveau marin avec des périodes de progradation (régression marine ou dépôt de delta) et des périodes de rétrogradation (transgressions marines). Les périodes de progradation génèrent des sédiments de plus en plus grossiers et des couches d'épaisseur métrique, tandis que les périodes de rétrogradation donnent des sédiments de plus en plus fins, déposés en couches centimétriques. Dans le Briovérien rennais, les périodes de rétrogradation se terminent souvent par une fine couche de "schistes graphiteux". Formellement, comme pour les autres formations, le dépôt a été de la siltite contenant de la matière organique, qui après métamorphisme se présente maintenant sous la forme de schistes graphiteux (Figure 5). Cette couche peu épaisse, mais de faible qualité mécanique, comme montré dans les paragraphes ultérieurs, peut être préjudiciable à la stabilité d'excavations à ciel ouvert ou souterraines si son pendage est orienté vers l'excavation.

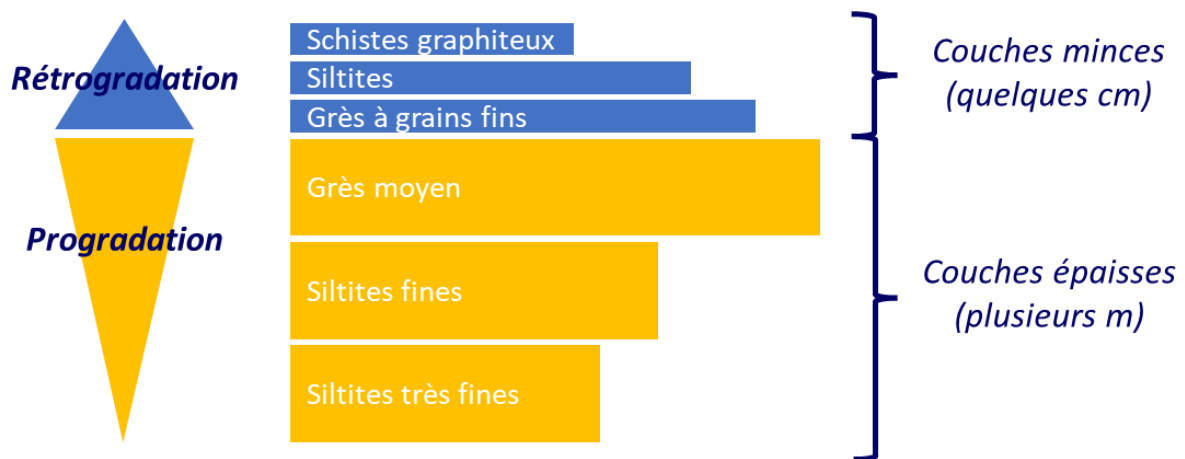


Figure 3 : Évolution de la lithologie en fonction des évolutions des avancées marines. Les triangles sur la gauche indiquent la variation de taille des particules: la pointe des triangles indique des sédiments fins alors que la base correspond aux sédiments grossiers.

Figure 3: Evolution of lithology according to the evolution of marine advances. The triangles, on the left, indicate the variation in particle size: the tip of the triangles indicates fine sediment while the base corresponds to coarse sediment.

L'évolution séquentielle conduit à des variations de granulométrie, encore visibles actuellement dans les terrains, et qui se retrouvent à différentes échelles (Figure 4). Bien que toutes ces formations soient aujourd'hui dénommées "schistes" au niveau centimétrique des alternances silto-gréseuses sont observées et, sur quelques mètres, des variations entre des grès grossiers (avec des particules de l'ordre de 2 mm) aux argilites (avec des particules de quelques μm) sont également identifiées. Localement on peut également trouver des microconglomérats, principalement à l'Est de Rennes.

L'hétérogénéité granulométrique à différentes échelles est un problème pour la caractérisation mécanique des matériaux.

Lors de prélèvements ponctuels sur site, il est difficile d'identifier la position de l'échantillon dans la séquence sédimentaire. Les matériaux ont donc été différenciés selon leur granulométrie en quatre catégories : siltites, grès gris, grès verdâtres et microconglomérats.

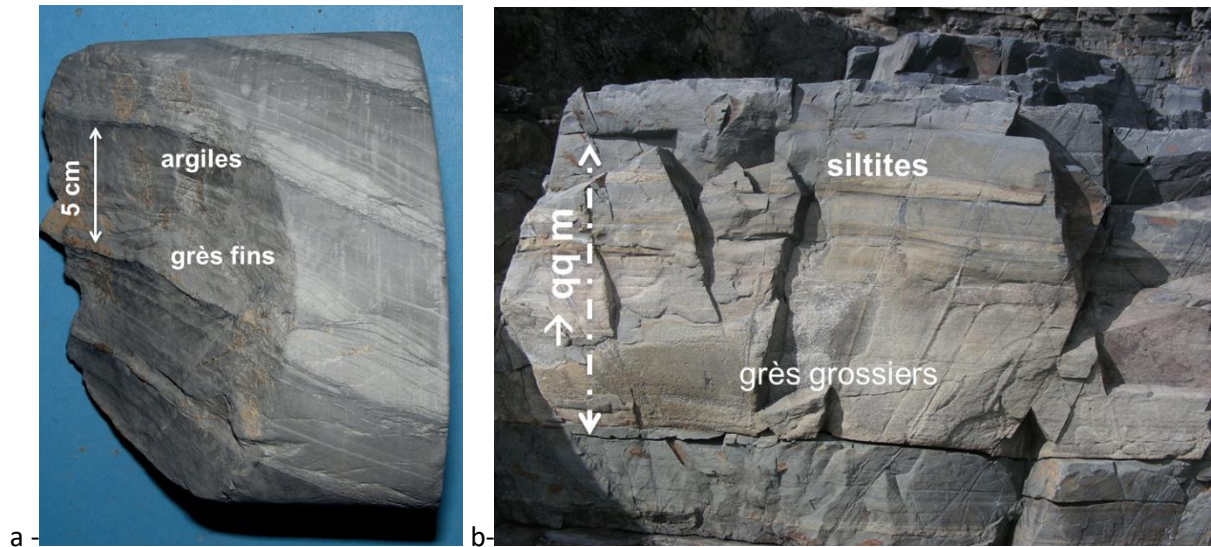


Figure 4 : Variations lithologiques à l'échelle centimétrique (a) et métrique (b)

Figure 4: Lithological variations on the centimetre (a) and metric (b) scale



Alternances silto-gréseuses
Silty-sandstone alternations

Schistes graphiteux
Graphite schists

Figure 5 : Présence de schistes graphiteux au sein d'alternance silto-gréseuses

Figure 5: Existence of graphite schists within the silty-sandstone alternation

Plissement et métamorphisme

Lors de l'orogénèse hercynienne (entre 300 et 400 Ma) les sédiments initialement en couches horizontales (stratification S_0), ont été plissés, fracturés et faiblement métamorphisés ($300^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ et $0.1\text{GPa} < P < 1\text{GPa}$). Le plissement a généré une schistosité S_1 de plan axial subverticale (cf. Figure 6-2), plus pénétrative dans les terrains silteux que les terrains gréseux (Figure 7). La schistosité peut donc avoir une obliquité variable par rapport à la stratification S_0 (cf. Figure 6-2) mais a toujours un fort pendage. La stratification elle-même est souvent subverticale, ce qui rend la différenciation *in situ* entre les deux orientations S_0 et S_1 difficile, notamment en l'absence de géologues sur le terrain.

Outre la stratification S_0 et la schistosité S_1 le massif est traversé de fractures (dénommées F_i dans la suite) conséquences des états de contraintes successifs.

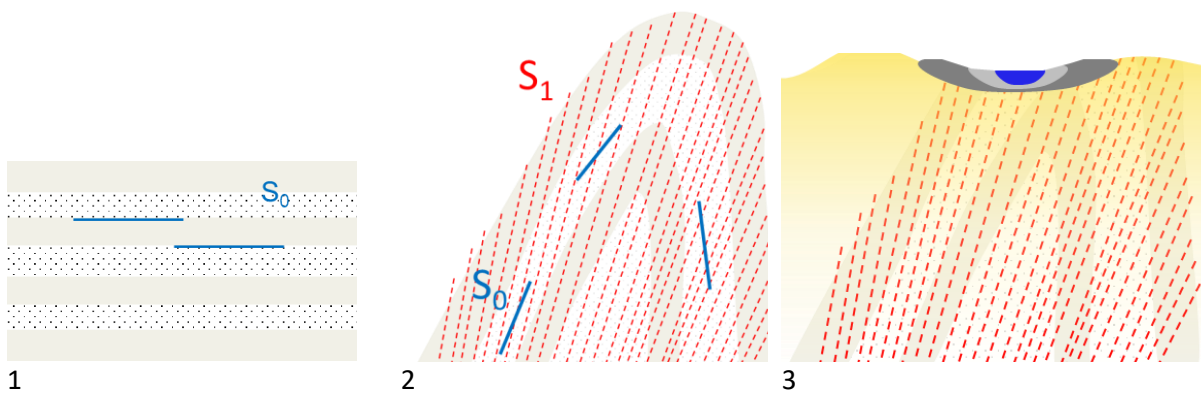


Figure 6 : Évolution des terrains briovériens : 1- dépôt (S_0 : stratigraphie), 2 - Plissement et métamorphisme (S_1 : schistosité) c- altération et érosion.

Figure 6: Evolution of Brioverian formations: 1- deposition (S_0 : stratigraphy), 2 - Folding and metamorphism (S_1 : schistosity) c- weathering and erosion.



Stratigraphie (zone gréseuse)
Stratigraphy (sandstone area)

Schistosité (zone silteuse)
Schistosity (silty zone)

≈5 cm

Figure 7 : Stratigraphie et schistosité

Figure 7: Stratigraphy and schistosity

Altération, érosion

Depuis l'Hercynien, les terrains briovériens ont subi une forte altération notamment sous climat tropical il y a 40 Ma. Ils ont également été affectés par l'érosion en surface. L'altération s'est développée à partir de la surface, mais également en profondeur. En effet les couches gréseuses, plus perméables favorisent la circulation d'eau (Figure 8) et ont permis le développement d'une altération "latérale" à partir de ces faciès. De ce fait, dans un sondage vertical et dans des fouilles, des formations fortement altérées peuvent se trouver sous des formations beaucoup plus saines. Les forages d'investigation ne doivent donc pas s'arrêter dès que des terrains résistants sont rencontrés.

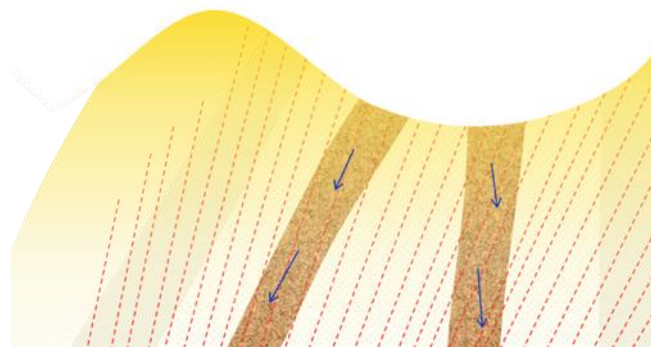


Figure 8 : Rôle des bancs gréseux d'orientation S0 dans la circulation de l'eau et dans l'altération

Figure 8: Role of sandstone bedding layers, S_0 oriented, in water circulation and weathering

Filons magmatiques

Outre les terrains briovériens, on retrouve à l'affleurement et en profondeur lors de travaux d'excavation des intrusions magmatiques sous forme de filons de roches magmatiques plutoniques (granodiorite et diorite), voire des roches volcaniques (Figure 9). Les filons se sont souvent injectés dans des discontinuités existantes (stratigraphie ou schistosité) et peuvent être peu épais. Lors de forages, les filons peuvent être rencontrés sur quelques mètres, mais laisser place en dessous à des terrains briovériens. Cette possibilité demande également de la vigilance lors de l'établissement du modèle géologique d'une zone de travaux.

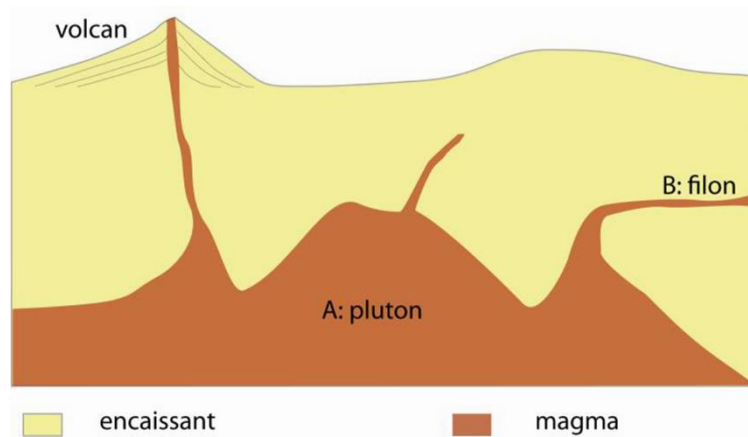


Figure 9 : Mise en place de roches magmatiques dans l'encaissant briovérien (d'après Dabard, 2015)

Figure 9: Setting up of magmatic rocks in the Brioverian country formation (According to Dabard, 2015)

Formations superficielles

Pour compléter la description des terrains rencontrés dans l'agglomération rennaise, comme montré dans la figure 2, des formations superficielles composées d'altérites, de sables, de lœss récents et d'alluvions de L'Ille et de la Vilaine peuvent recouvrir localement les terrains plus anciens.

Exemple d'observations de terrain

Pour illustrer les hétérogénéités observables, sur des distances décimétriques lors de travaux, la Figure 10 affiche le plan d'une station de la ligne b du métro de Rennes en cours d'excavation. La fouille étant très encombrée, seules quelques zones (matérialisées par des ovales sur la Figure 10) ont permis d'observer l'affleurement et d'identifier différents faciès.

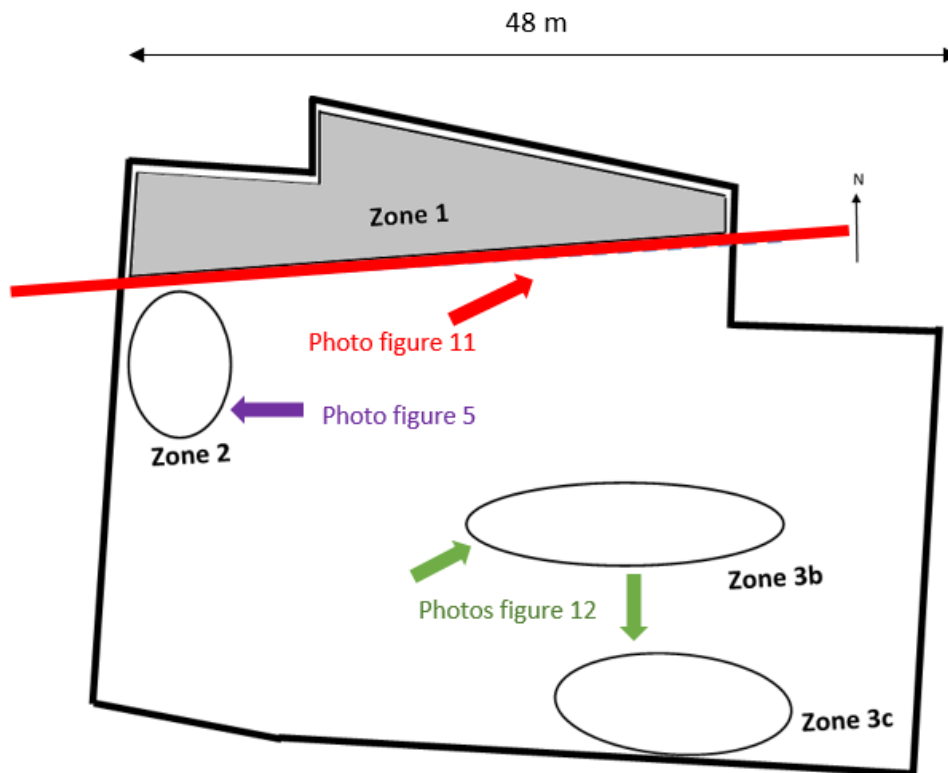


Figure 10 : Vue en plan de la station de métro en cours d'excavation- les flèches indiquent la direction des prises de vue

Figure 10: Metro station during excavation – the arrows indicate the direction of the photographic shot

Dans la zone 1, des grès très altérés ont été identifiés. La ligne rouge matérialise un contact, visible sur la photo de la Figure 11, entre ces grès et des siltites. La zone 2 permet de voir des alternances silto-gréseuses avec des schistes graphiteux caractéristiques de la fin d'une période de rétrogradation déjà présentées à la Figure 5. Bien que la couche soit centimétrique, elle joue un rôle important dans le comportement du massif et peut être très défavorable selon son orientation. Enfin des siltites grises occupent une surface importante dans la zone 3 (Figure 12). Sur quelques mètres des faciès très différents sont donc rencontrés dans cette station. Au Nord (zone 1) des faciès de progradation en couches relativement épaisses sont identifiés, au Sud des faciès de rétrogradation affleurent et entre les deux, dans la zone 2, les faciès caractéristiques de la fin de la rétrogradation en couches fines sont observés



Figure 11 : Contact grès altéré (à gauche) / siltite (à droite) entre la zone 1 et le Sud de la station présentée Figure 10 en cours d'excavation/

Figure 11: Altered sandstone (left) / siltstone (right) contact between zone 1 and the south of metro station of figure 10 during excavation.



Figure 12 : Siltite fine grise zone 3b à gauche et zone 3c à droite

Figure 12: Fine grey siltite 3b zone on the left and 3c zone on the right

L'histoire géologique explique donc la multiplicité des matériaux rencontrée dans l'agglomération rennaise lors de travaux de génie civil et concernant les matériaux briovériens, leur hétérogénéité et leur anisotropie.

Cependant, la compréhension des séquences sédimentaires du Briovérien a permis de classer les échantillons collectés en différents faciès pour analyser leurs propriétés mécaniques.

Avant de détailler les essais mécaniques réalisés sur les échantillons de l'agglomération rennaise, le paragraphe suivant donne quelques éléments sur les caractéristiques minéralogiques des matériaux briovériens

Minéralogie des matériaux

Des caractérisations minéralogiques ont été réalisées via deux méthodes : diffraction X et observations au microscope électronique à balayage (MEB). La diffraction des rayons X, menée sur des échantillons de schistes réduits en poudre, a permis de mettre en évidence la présence systématique de certains minéraux : quartz et argiles (kaolinite, chlorite, illite et parfois de la smectite), mais en proportion variable suivant les échantillons (Le Cor, Rangeard et Merrien-Soukatchoff, 2012).

Des observations faites au MEB ont permis de différencier les schistes argileux (plaquettes visibles sur la Figure 13-a) des schistes gréseux (structure plus granulaire sur la Figure 13-b) ; elles sont donc en accord avec les différences visuelles observées.

Nous ne détaillons pas plus ici cette minéralogie, mais elle sera précisée quand elle exerce une influence sur les propriétés mécaniques (cf. paragraphes suivants).

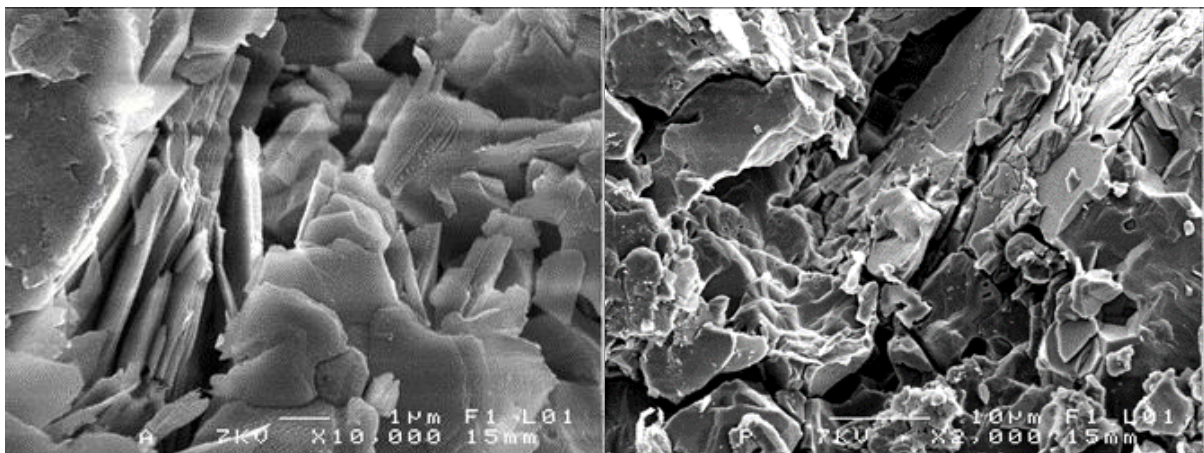


Figure 13 : Schiste argileux à gauche(a) et schiste gréseux à droite (b)

Figure 13 : Clayey shale on the left (a) and sandstone shale on the right (b)

Propriétés des terrains de l'agglomération rennais

Les propriétés du massif rocheux rennais résultent des propriétés de la matrice et des discontinuités, elles-mêmes conditionnées par leur état hydrique et leur degré d'altération. La matrice est composée de faciès variables, comme évoqué dans les paragraphes précédents et les terrains briovériens sont traversés par trois types de discontinuités, la stratification S_0 , la schistosité S_1 et des fractures F_i . Dans les paragraphes suivants, les propriétés des différents faciès de matrice rocheuse sont présentées, ainsi que des essais réalisés sur certains types de discontinuités. Ces essais ont été réalisés à l'INSA de Rennes au cours une dizaine d'années et des résultats partiels ont déjà été présentés (Guiheneuf, Rangeard, Merrien-Soukatchoff et Dabard, 2018a, 2018b; Le Cor, 2014; Le Cor, Larcher, et al., 2014; Le Cor, Larcher, Rangeard, Merrien-Soukatchoff et Takarli, 2013; Le Cor, Merrien-Soukatchoff, Rangeard, Rescourio et Simon, 2014; Le Cor, Merrien-Soukatchoff, Rangeard et Simon, 2012; Le Cor, Rangeard et Merrien-Soukatchoff, 2012; Le Cor, Rangeard, Merrien-Soukatchoff et Simon, 2013, 2014, 2015)

Propriétés de la matrice

Plusieurs types d'essais ont été réalisés afin de caractériser la matrice rocheuse selon la résistance, l'anisotropie, et l'altération. La résistance a été mesurée de manière classique à partir d'essais de compression uniaxiale. L'anisotropie a été évaluée à partir d'une méthode non destructive par mesure

de la vitesse des ondes. Enfin, pour appréhender l'état d'altération de la matrice, des essais spécifiques d'altération ont été développés et réalisés sur les matériaux du briovérien. La majorité des échantillons proviennent du Briovérien, mais nous avons également conservé dans cet inventaire les essais réalisés sur les roches magmatiques. Les échantillons ont été classés en 6 groupes :

- siltite,
- grès gris,
- grès verdâtre,
- microconglomérat,
- granodiorite,
- microgranite.

Les premiers faciès correspondent à des terrains du Briovérien et outre le classement en fonction la granulométrie, les grès ont été différenciés en fonction de leur couleur. La variation de couleur à l'affleurement suggérait en effet une différence de degré d'altération. Les deux derniers faciès, présentant moins d'échantillons, sont relatifs aux roches magmatiques filoniennes.

Résistance et déformabilité en compression simple

Les essais de compression simple peuvent apparaître comme très banals, mais ils ont posé des difficultés dans ces matériaux qui n'ont pas pu être caractérisés de manière normalisée : pas de possibilité de prélèvement par carottage sur site et taillage imprécis au laboratoire. Après de nombreuses tentatives, nous avons opté pour des essais sur des éprouvettes parallélépipédiques, taillées à la scie diamantée, en visant un élanement le plus proche de 2. Nous n'avons pas choisi la dimension des éprouvettes qui a été guidée par la présence de discontinuités qui s'ouvraient lors du taillage.

Compte tenu de ces éléments, nous avons cherché à tester le plus possible d'échantillons par faciès, même si l'essai ne pouvait pas se faire dans des conditions normalisées.

Macroscopiquement, différents modes de rupture sont observés (Figure 14) suivant l'état hydrique et les discontinuités traversant l'échantillon.

Pour les siltites, les contraintes de taillage conduisent souvent à obtenir une schistosité parallèle à la grande dimension de l'éprouvette. À l'état humide, la rupture est obtenue dans ce cas par ouverture des plans de schistosité (photo a), et le comportement est plutôt ductile.

Dans certains cas, à l'état sec, la rupture est fragile et obtenue par ouverture de plusieurs plans de discontinuités (photo b). Lorsque l'éprouvette ne contient pas de discontinuité, la rupture est fragile et se localise sur un ou deux plans (photo c). Enfin, pour les microconglomérats, la rupture fragile conduit à un éclatement de l'échantillon (photo d).

Pour évaluer l'influence de l'état hydrique des matériaux, des essais ont été réalisés sur éprouvettes à différentes conditions d'humidité. Des essais ont été réalisés sur éprouvettes dites sèches ($w < 1\%$) et sur éprouvettes dites « saturées » (éprouvettes immergées pendant 48 h avant réalisation des essais).

La résistance ainsi que le comportement (fragile ou ductile) sont très variables (Figure 15-a), mais la ductilité augmente avec la teneur en eau pour les siltites. Les éprouvettes de siltites présentent, après immersion, les variations de teneur en eau par rapport à l'état sec les plus fortes (Figure 15-b).

Tous faciès confondus, la teneur en eau influence fortement la résistance et la déformabilité (Figure 16). Cette influence est donc plus importante pour les siltites qui présentent une plus forte amplitude de variation de teneur en eau comme montré par la Figure 15-b.

La représentation de l'évolution de la résistance et de la déformabilité en fonction de la masse volumique sèche (Figure 17) montre que celle-ci peut être un indicateur simple pour évaluer la résistance des matériaux, même si la dispersion autour de la valeur moyenne est assez importante.

Finalement, la discrimination en faciès et le rôle du degré de saturation sont montrés dans la Figure 18. Cette figure synthétise plus de 4000 essais de compression, seules les moyennes par site de prélèvement (un site de prélèvement correspond à un chantier d'excavation) sont représentées. L'état apparent correspond à la teneur en eau lors du prélèvement. Cette figure montre la décroissance de la résistance avec la saturation sur un même site et une variabilité intersite pour un même faciès. Cette variabilité est en grande partie imputable à l'état d'altération du matériau prélevé et à sa teneur en eau (Figure 16). La plupart des échantillons ont des résistances qui les classent en SIRT (Sols indurés et Roches tendres).

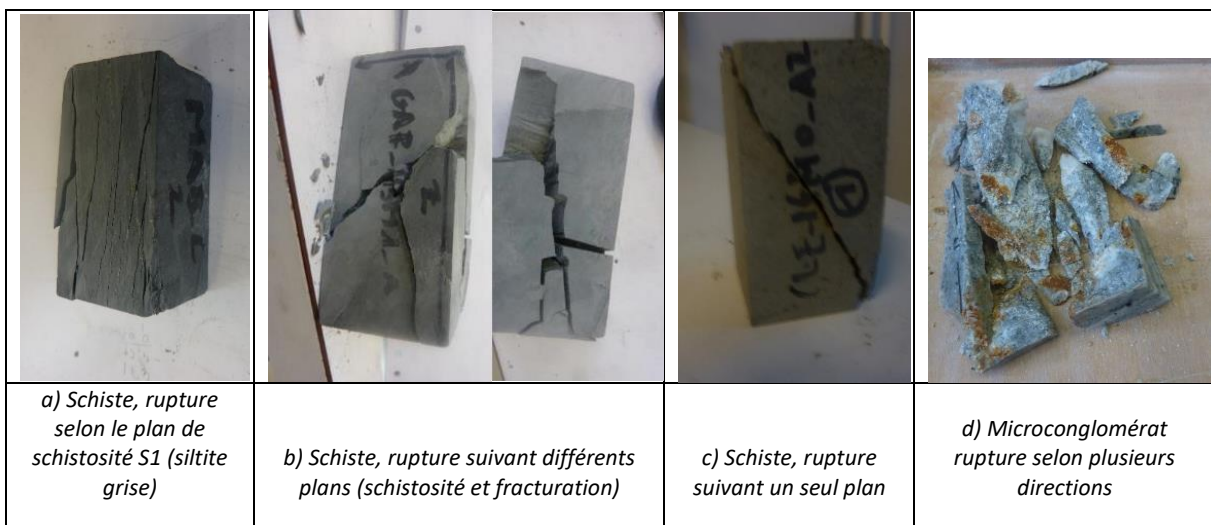


Figure 14 : Différents modes de rupture des éprouvettes (Plus grande dimension $L \approx 10$ cm)

Figure 14: Different modes of failure of specimens

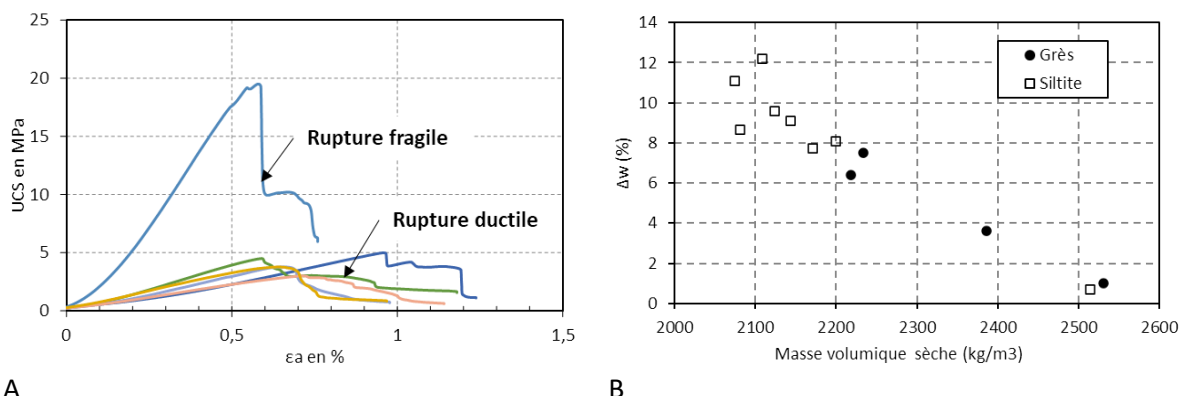


Figure 15 : Essais de compression simple. a) Courbe contrainte-déformation montrant différents types de comportements. b) Variation de la teneur en eau entre l'état « sec » et « saturé » en fonction de la masse volumique sèche

Figure 15 : Unconfirmed Compressive Strength (UCS). a) Stress-strain curve displaying different types of behaviour. b) Variation of density with water content

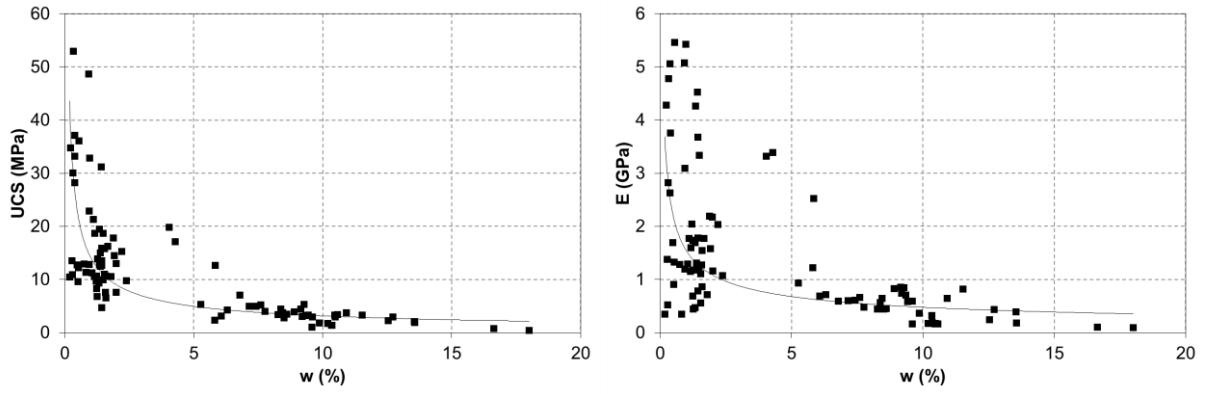


Figure 16 : Variation de la résistance à la compression (à gauche) et du module d'Young (à droite) avec la teneur en eau.

Figure 16: UCS (left) and Young's modulus (right) versus water content.

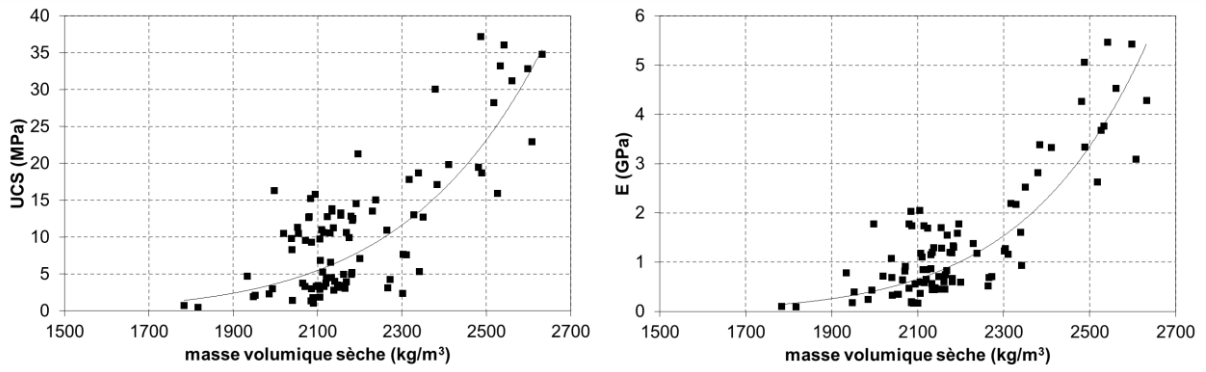


Figure 17 : Variation de la résistance à la compression (à gauche) et du module d'Young (à droite) avec la masse volumique sèche

Figure 17: UCS (left) and Young's modulus (right) versus dry density

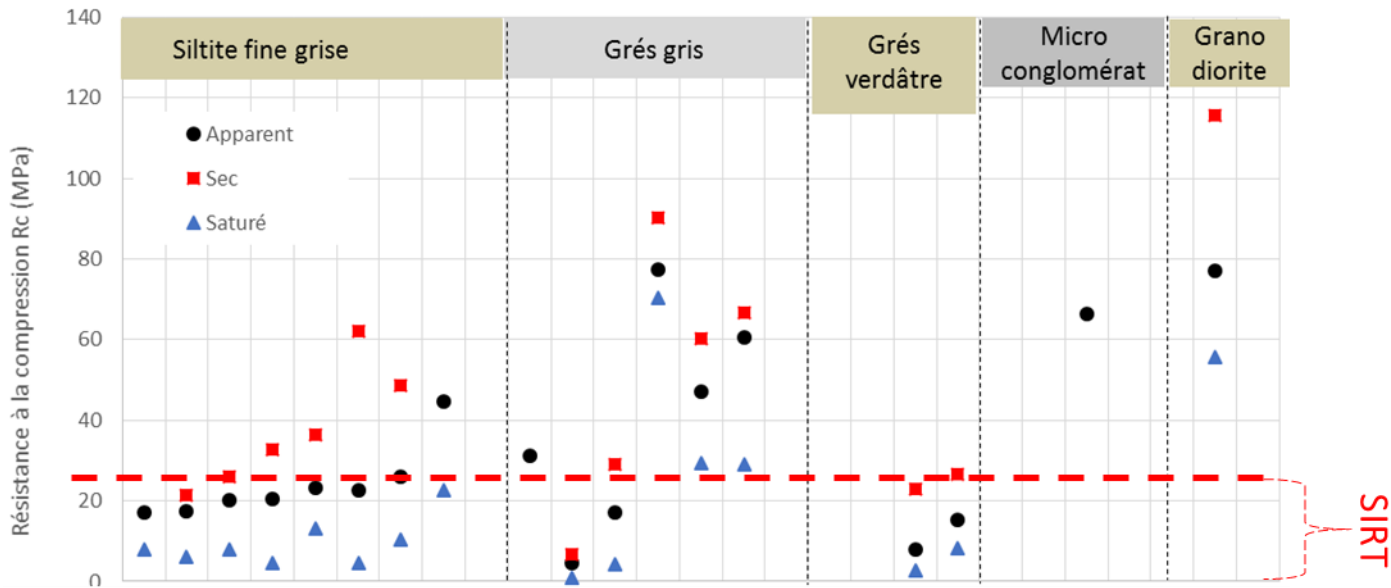


Figure 18 : Résistance à la compression en fonction des différents faciès et du degré de saturation (l'échelle horizontale correspond aux sites de prélèvement). Chaque point est une moyenne par site. Plus de 4000 essais de compression sont synthétisés dans ce graphique.

Figure 18: UCS according to the different facies and the degree of saturation (the horizontal scale corresponds to the sampling sites). Each point is an average per site. More than 4000 tests are summarised in this graph.

Compte tenu des difficultés d'échantillonnage, le rôle de l'anisotropie n'a pu être testé que sur quelques rares échantillons.

En revanche, les mesures de vitesse d'onde décrites dans le paragraphe ci-dessous permettent de quantifier l'anisotropie de la matrice.

Caractérisation de l'anisotropie par mesure de vitesse d'onde

Pour quantifier l'anisotropie, des mesures de vitesses d'ondes P ont été réalisées dans la direction perpendiculaire à la structure visible (stratification ou schistosité), quand cette dernière est identifiable, et dans les 2 directions perpendiculaires. Les 3 vitesses mesurées minimale (V_{\min}), maximale (V_{\max}) et intermédiaire (V_{inter}) permettent de représenter 2 ratios d'anisotropie reportés sur la Figure 19. Cette figure représente la synthèse de plus de 1500 mesures. Chaque point est la moyenne des mesures réalisées par faciès et par site.

Lorsque les trois mesures (V_{\max} , V_{\min} , V_{inter}) sont proches, la matrice est isotrope. C'est le cas des roches magmatiques (Figure 19).

Quand le matériau n'est pas isotrope, une seule direction préférentielle planaire est généralement identifiable à l'œil. La mesure d'une vitesse intermédiaire V_{inter} différente de V_{\max} permet de différencier des cas d'isotropie transverse, de cas anisotropes.

Quand deux des vitesses mesurées sont proches et différentes de celle mesurée dans la troisième direction, la matrice est isotrope transverse et cela laisse penser que schistosité et stratification sont confondues (Figure 20-a). Dans ce cas V_{\min} correspond à la direction perpendiculaire au plan isotrope et les rapports V_{\max}/V_{int} sont proches de 1.

Dans le cas anisotrope, stratification et schistosité ont probablement une orientation différente comme illustré par la Figure 20-b.

Globalement les rapports d'anisotropie sont très variables au sein d'un même faciès et les ratios V_{max}/V_{min} varient de 1 à 3,6. Les matériaux magmatiques sont isotropes et l'anisotropie augmente quand on passe des microconglomérats aux grès puis aux siltites.

Les résultats détaillés de ces mesures sont présentés dans Le Cor, Larcher et al. (2014) et Le Cor, Larcher, Rangeard, Merrien-Soukatchoff et Takarli (2013).

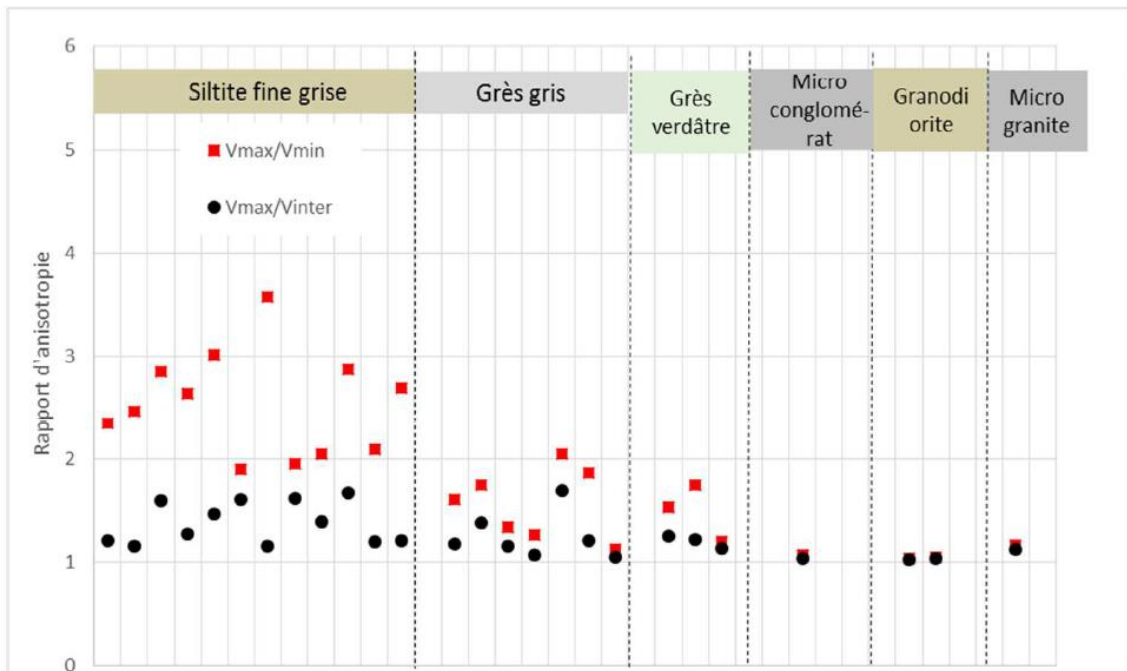


Figure 19: Rapport d'anisotropie par mesure de vitesse d'onde.

Figure 19: Anisotropy ratio from wave velocity measurements

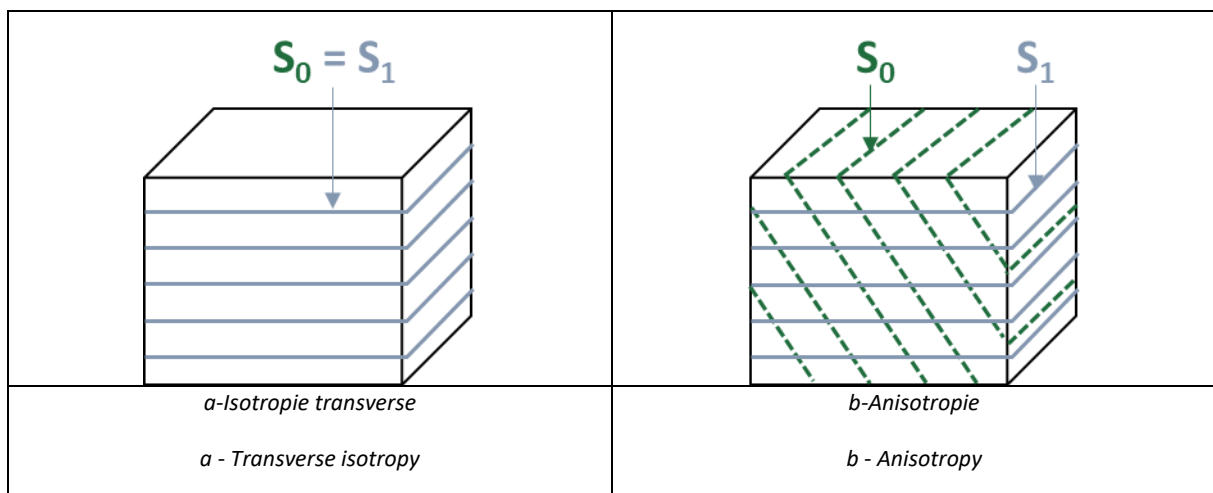


Figure 20: Orientation relative de la stratification et la schistosité

Figure 20: Relative orientation of stratification and schistosity

Caractérisation de l'altération

L'AFTES (2003) propose de classer l'état d'altération du massif rocheux en six catégories allant du rocher sain AM1a au rocher complètement décomposé AM6. Quasiment tous les terrains briovériens et plus généralement de l'agglomération rennais sont classés en AM4 ou AM5 c'est-à-dire dans les catégories « rocher très altéré à complètement altéré », ce qui est peu discriminant. Macroscopiquement une variabilité et une différence de comportement in situ sont observées, voire « subies » par les entreprises lors de travaux, ce qui a conduit à chercher des indicateurs permettant une caractérisation complémentaire de la matrice rocheuse, vis-à-vis de son état d'altération.

Des essais d'abrasivité normalisés, rayure avec une pointe (Abrasive « Cerchar », NF P94-430-1) ou par outil en rotation (Abrasive LCPC, NF P94-430-2) ont été mis en œuvre. L'essai Cerchar (AFNOR, 2020 et ASTM, 2010) consiste à pratiquer une rayure sur un échantillon de roche au moyen d'une pointe en acier et à mesurer la longueur usée de la pointe. L'indice d'abrasivité au pic, CAI est directement lié à la longueur du méplat formé. Cet essai n'est pas du tout discriminant (Figure 21) sur les faciès du Briovérien. L'essai Abrasive LCPC (Figure 22) est habituellement réservé à la caractérisation de granulats, et consiste à entraîner en rotation une plaquette en acier de dimension et de nuance définies dans une masse de la fraction 4/6,3 mm du matériau. Dans notre cas, la roche est préalablement broyée, puis la fraction 4/6,3 mm est sélectionnée pour l'essai. Ainsi, les parties de la roche les plus fines et friables sont exclues à l'étape de préparation.

L'essai appliqué aux matériaux du Briovérien, ne semble pas discriminant pour les siltites, même s'il l'est partiellement pour les grès. Outre l'abrasivité cet essai permet de déterminer la broyabilité. Cette dernière est définie comme le pourcentage d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits par la sollicitation.

Ces essais ont été dimensionnés pour avoir une sollicitation permettant de discriminer les roches pour l'un, et les granulats destinés à la construction pour l'autre. L'énergie normalisée de ces essais est donc importante lorsque l'on cherche à caractériser un matériau de plus faibles caractéristiques, comme ceux du briovérien rennais, et plus généralement pour les SIRT. Nous avons adapté les protocoles afin de différencier de manière plus sélective l'état d'altération des matériaux.

L'essai de broyabilité a été adapté en mesurant le pourcentage de fines produites en fonction du temps : mesures échelonnées entre 0 et 150 secondes (Figure 24). La mesure de la broyabilité à 30 secondes semble permettre une meilleure discrimination des matériaux entre eux (Le Cor, Rangeard, Merrien-Soukatchoff et Simon, 2013).

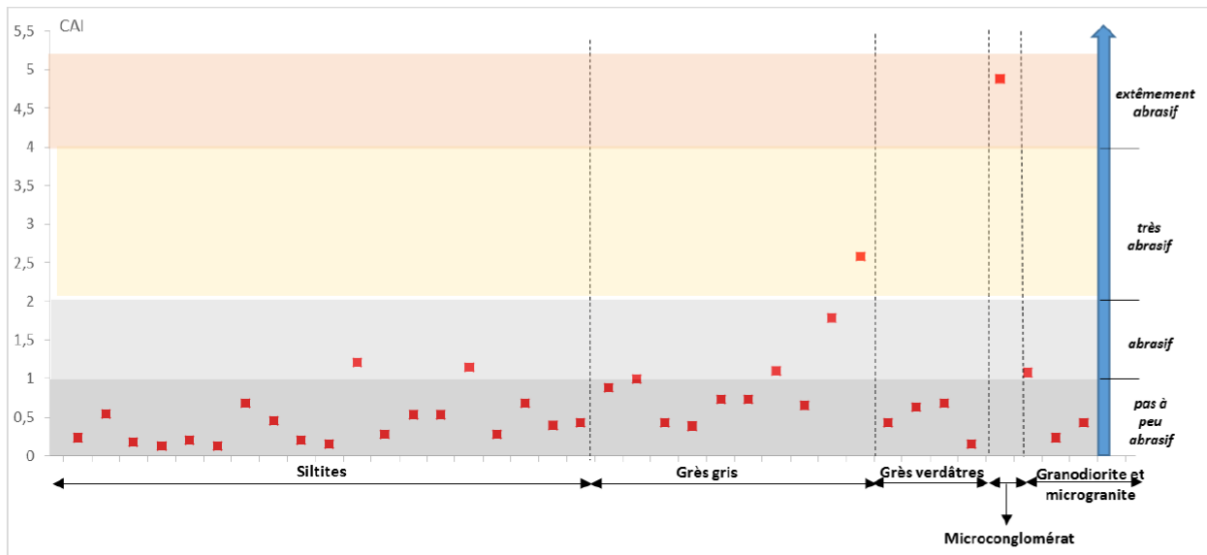


Figure 21 : Index d'abrasivité Cerchar (CAI) en fonction des faciès.

Figure 21: Cerchar abrasivity Index (CAI) as a function of the matrix facies

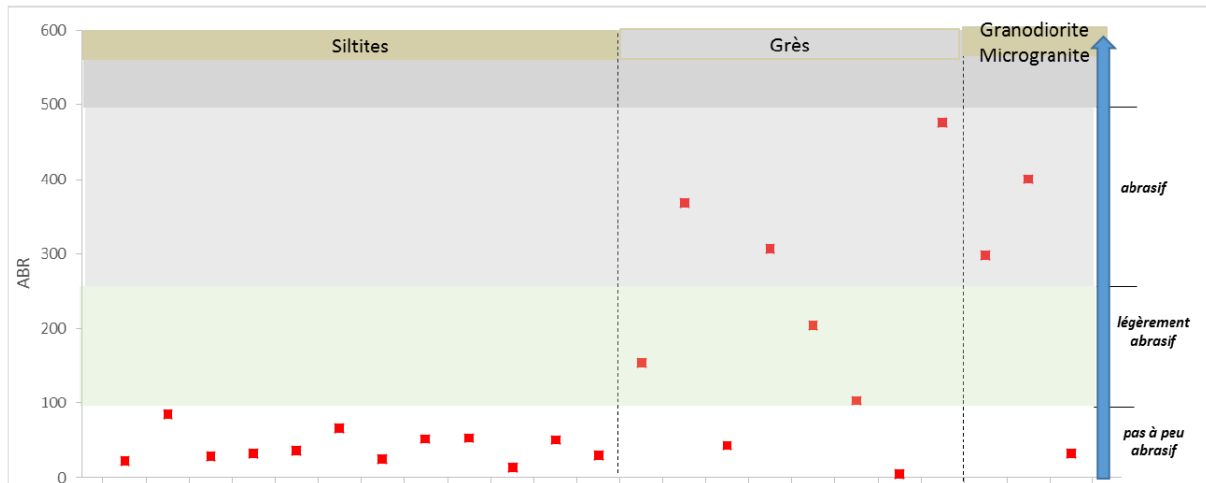


Figure 22 : Abrasivité LCPC en fonction du faciès

Figure 22. LCPC Index (ABR) as a function of the matrix facies

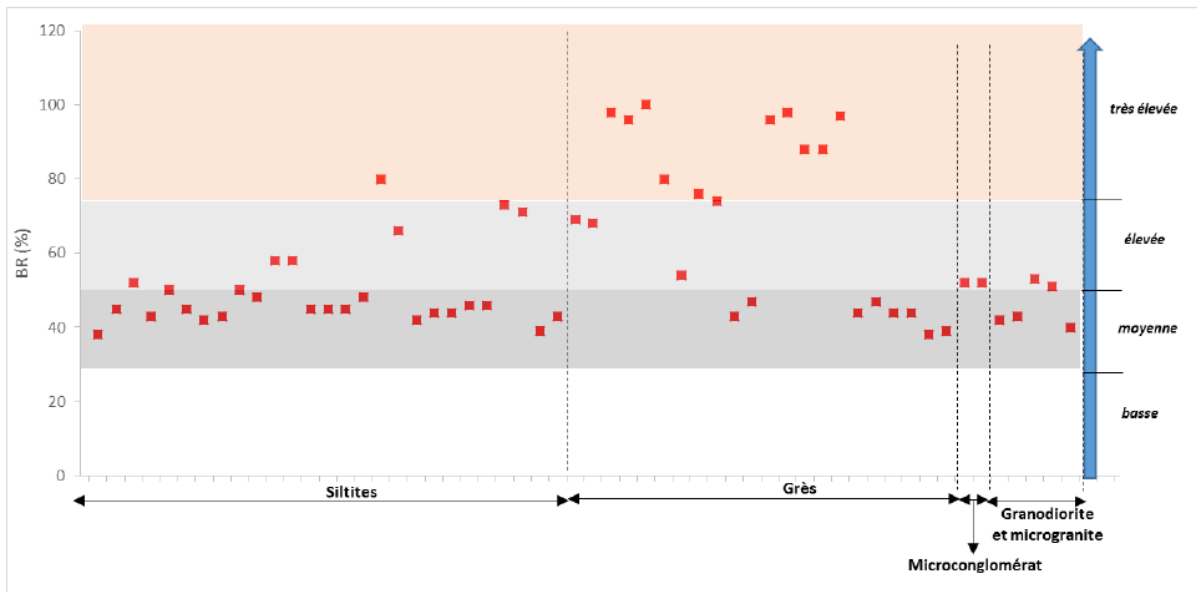


Figure 23 : Broyabilité LCPC en fonction du faciès

Figure 23 : LCPC Grindability index (BR) as a function of the matrix facies

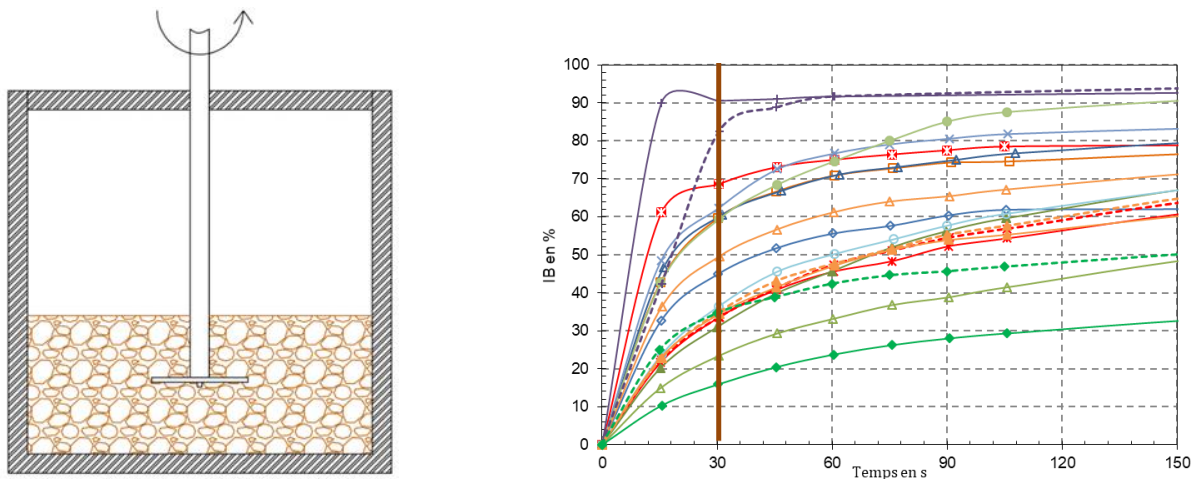


Figure 24 : Essai de broyabilité. À gauche schématisation de l'essai. À droite broyabilité en fonction du temps pour différents sites d'étude.

Figure 24 : Grindability test. Left schematisation of the test. Right grindability as a function of time for different sites.

Le deuxième essai développé est une adaptation de l'essai micro-Deval pour quantifier la résistance à l'attrition. Un échantillon grossièrement parallélépipédique est mis en rotation dans une jarre micro-Deval, sans eau, avec les charges abrasives (billes d'acier) et la perte de masse, normalisée par la surface offerte à l'abrasion, est mesurée en fonction du temps (Figure 25). Pendant la première phase, la perte de masse est importante du fait de la rupture des arêtes du bloc parallélépipédique, puis la perte de masse évolue linéairement en fonction du temps. La vitesse de perte de masse de cette deuxième phase est caractérisée par un coefficient d'usure, noté C_{uh} .

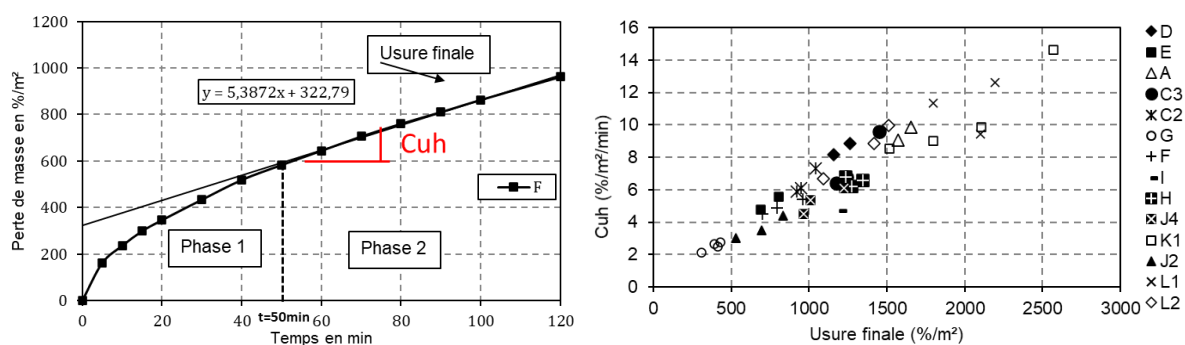


Figure 25 : Essai micro-Deval fractionné. À gauche : courbe de la perte de masse en fonction du temps. À droite : relation entre le coefficient d'usure et l'usure finale

Figure 25: Fractionated micro-Deval test. On the left: curve of the loss of mass as a function of time. Right: relation between the wear coefficient and the final wear

Le Cor (2014) a proposé une subdivision aux classes d'altérations du massif pour les terrains du Briovérien rennais en se basant sur ces essais (Tableau 1). Les limites retenues (Cuh à 5,5%/m²/min et de IB30 à 40%) ont permis à Le Cor de séparer des échantillons de résistances très variables de ceux dont la résistance est toujours inférieure à 20 MPa (Le Cor et al., 2013).

Tableau 1 : Proposition de raffinement de la classification AFTES basé sur l'essai micro-Deval modifié, la broyabilité à 30 secondes et l'abrasivité (d'après Le Cor, 2014)

Tableau 1: Proposal for refinement of the AFTES classification based on modified micro-Deval test, grindability at 30 seconds and abrasiveness (from Le Cor, 2014).

Classe d'altération		Classe de discontinuité (« fracturation »)		Micro-Deval modifié	Broyabilité à 30 secondes et abrasivité	Classification proposée
AM6						Altérites
AM5-AM4	Très friable à friable			Cuh > 5,5%/m²/min	IB30 > 40 %	D4
					IB30 ≤ 40%	D3
				Cuh ≤ 5,5%/m²/min	Coefficient abrasivité < 150	D2
					Coefficient abrasivité ≥ 150 g	D1
AM3-AM1	Non friable	ID5	Fragmenté			
		ID4-ID3	Très fracturé à fracturé			
		ID2-ID1	Peu fracturé			

Propriétés des discontinuités des terrains briovériens

Comme pour la matrice rocheuse, effectuer des essais normalisés de mécanique des Roches sur les discontinuités du Briovérien pose des problèmes de prélèvement et de taillage. Par ailleurs il n'y a pas de machine de cisaillement de mécanique des roches à Rennes.

Comme la résistance des discontinuités est faible et pour pouvoir effectuer plusieurs échantillons par discontinuités nous avons choisi de faire des essais sur des petites surfaces et une boîte de cisaillement de mécanique des sols a été adaptée pour ces essais.

De nombreuses discontinuités ouvertes ont été prélevées sur les sites d'excavation. Elles correspondaient principalement à de la schistosité.

Pour chaque site et chaque type de lithologie, plusieurs éprouvettes ont été confectionnées à partir d'une même discontinuité prélevée (Figure 26). Après scellement dans du ciment, chaque éprouvette est cisailée avec plusieurs cycles (4 à 5) à des contraintes normales croissantes (Figure 27) comme proposé dans les travaux de Jafari et al. (2004). Les cisaillements maximaux pour chaque contrainte normale et chaque éprouvette sont présentés dans un plan de Mohr (Figure 28) et compte tenu du bon ajustement linéaire un critère de Mohr-Coulomb a été ajusté. Les résultats détaillés de certains de ces essais ont été présentés dans Guiheneuf et al. 2018-a et 2018-b. Nous ne mentionnons ici que les moyennes par faciès et par site.

Comme les discontinuités testées sont ouvertes, seuls les angles de frottement sont représentés en fonction du faciès Figure 29, Figure 30 et Figure 31. Les schistes graphiteux sont rencontrés moins souvent que d'autres faciès, car ils ne sont présents qu'en couches fines, au maximum quelques centimètres d'épaisseur, ils présentent un aspect très lustré et leur angle de frottement est faible à très faible (Figure 29), toujours inférieur à 20°. Les siltites (Figure 30) ont deux types de comportements, des siltites ayant un angle de frottement autour de 20-25° sur les sites 4 et 7 et d'autres siltites ayant des angles de frottement plus élevés. Celles dont les discontinuités présentent un angle de frottement faible sont des siltites pour lesquelles de la smectite a été identifiée dans les produits d'altération le long des discontinuités. L'angle de frottement des grès est influencé par la granulométrie (Figure 31). La Figure 32 montre que dans l'ensemble l'angle de frottement augmente avec la granulométrie. Cette figure montre également la diminution de l'angle de frottement pour les essais effectués après immersion des éprouvettes (figuré "Wet"). Cet effet est particulièrement notable pour les schistes graphiteux où cet angle chute à moins de 10°, alors que la teneur en eau n'a pratiquement aucun effet sur les discontinuités gréseuses.



Prélèvement de la discontinuité ouverte
Sampling of the open discontinuity



Confection de plusieurs éprouvettes par discontinuité
Production of several test specimens by discontinuity

Figure 26 : Protocole de caractérisation : un site, une lithologie, une discontinuité

Figure 26: Characterization protocol: a site, a lithology, a discontinuity

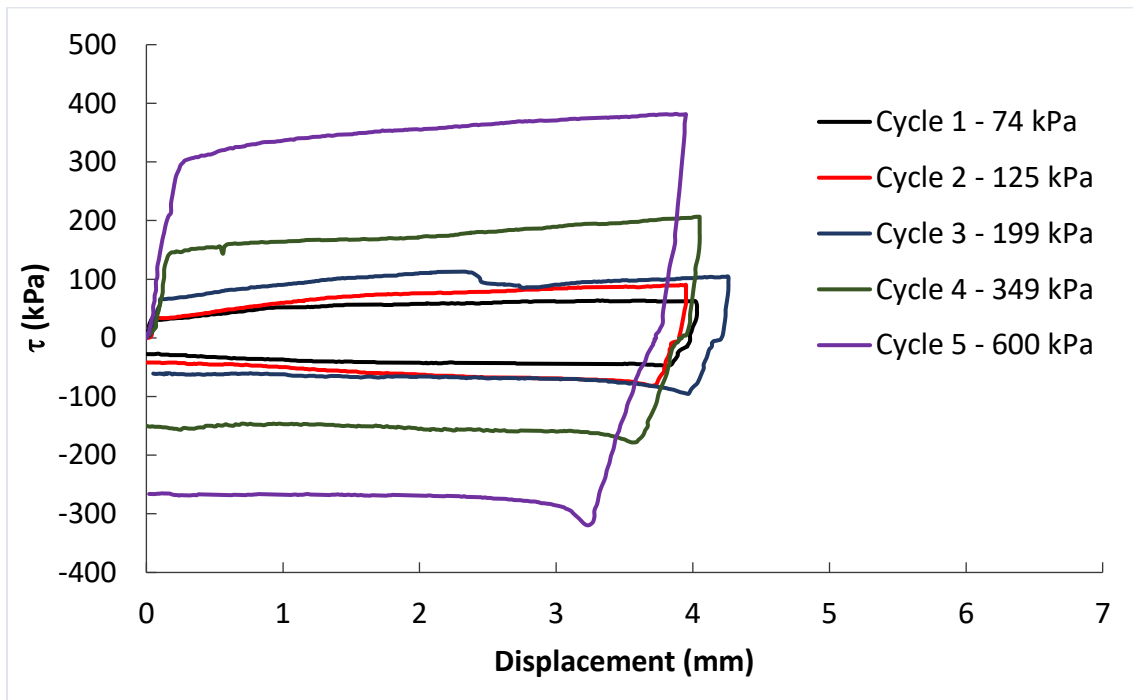


Figure 27 : Exemple d'essai de cisaillement comportant 5 cycles à contrainte normale croissante.

Figure 27: Example of a shear test with 5 cycles at increasing normal stress.

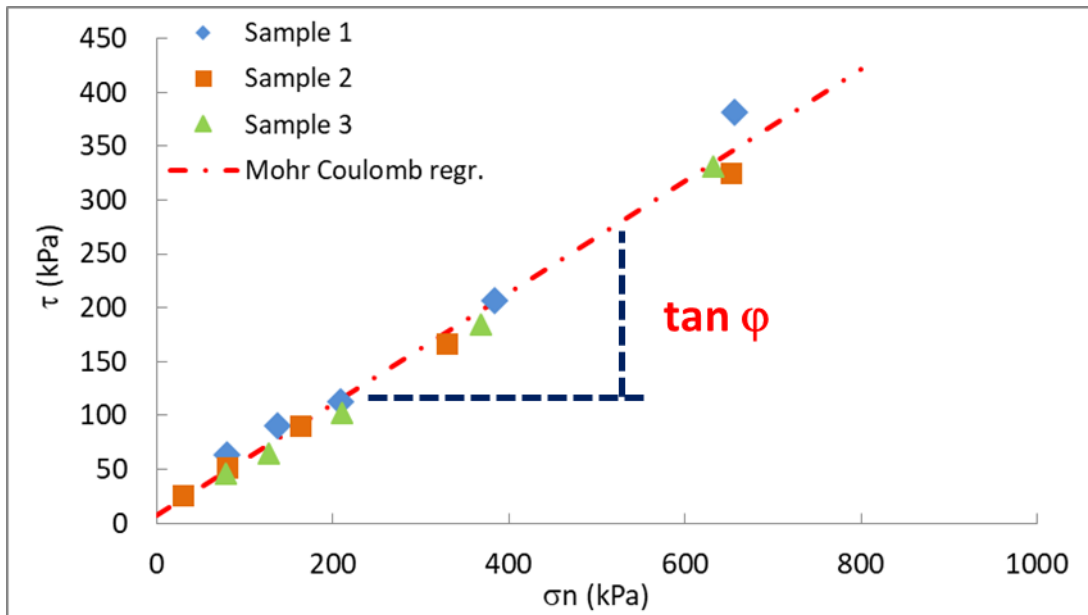


Figure 28 : Représentation dans le plan de Mohr de l'ensemble des éprouvettes d'un site

Figure 28: Display in the Mohr plane of all the tested specimens of a site

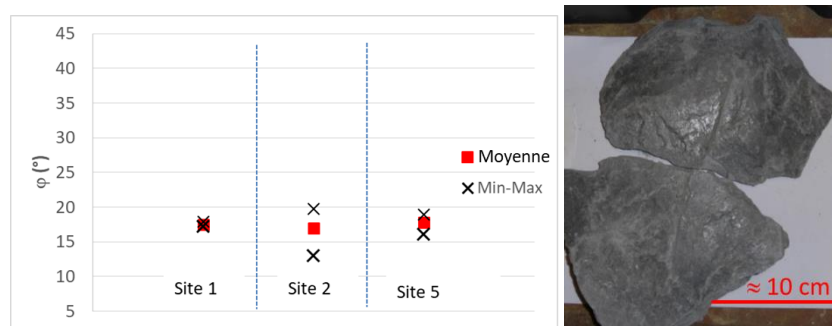


Figure 29 : Angle de frottement (à gauche) des discontinuités de schistes graphiteux (photo à droite). Au centre position dans la séquence stratigraphique.

Figure 29: Friction angle (on the left) of discontinuities of graphite schists (photo on the right). In the centre position in the stratigraphic sequence.

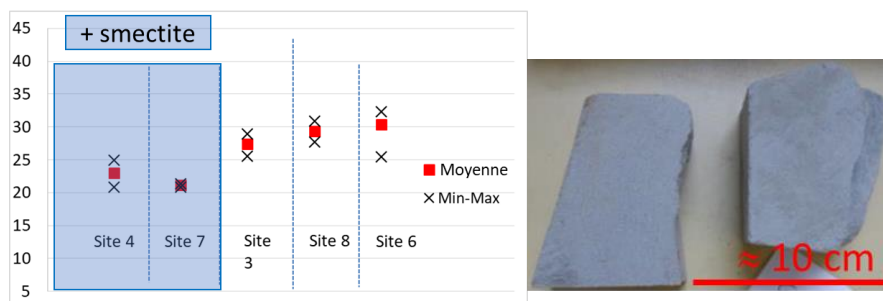


Figure 30 : Angle de frottement (à gauche) des siltites (photo à droite). Au centre position dans la séquence stratigraphique.

Figure 30: Friction angle (left) of discontinuities in fine shales = siltstone (photo on the right). In the centre position in the stratigraphic sequence.

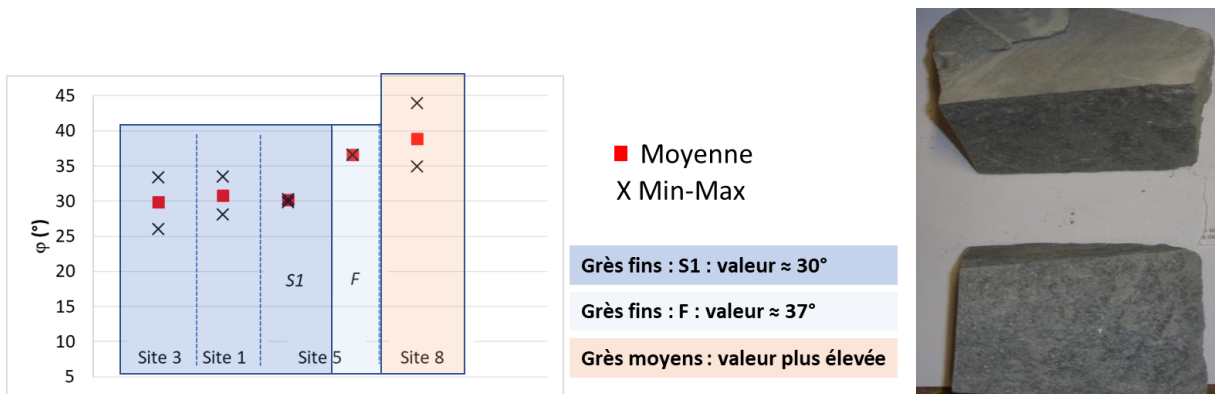


Figure 31 : Angle de frottement (à gauche) des discontinuités des grès (photo à droite). Au centre position dans la séquence stratigraphique.

Figure 31: Friction angle (left) of discontinuities of sandstone (photo on the right). In the centre position in the stratigraphic sequence.

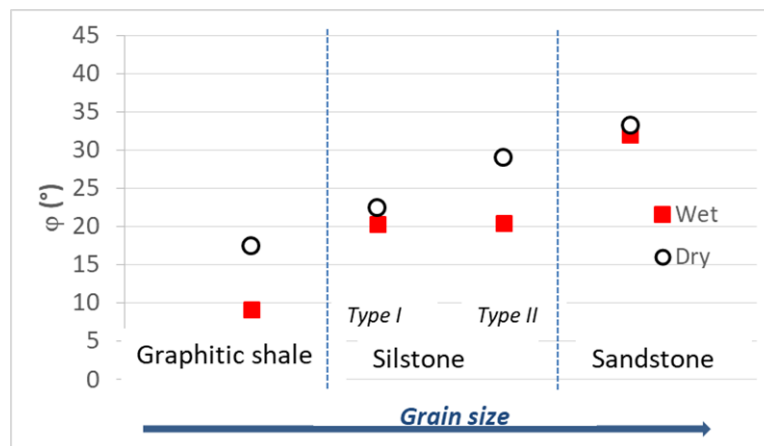


Figure 32 : Synthèse des angles de frottement des discontinuités en fonction de la granulométrie

Figure 32: Summary of the friction angles of the discontinuities as a function of the grain size.

Massif rocheux et excavations

Les propriétés de la matrice et des discontinuités, mais également les orientations des discontinuités, leur densité et persistance contribuent aux propriétés du massif rocheux. Sur la Figure 33, une succession de séquences stratigraphiques est représentée. Les périodes de progradation et rétrogradation sont figurées, en haut des dessins, par des polygones jaunes et bleus. L'orientation des excavations par rapport aux couches de faibles propriétés mécaniques, par exemple les schistes graphiteux et les discontinuités dans ces schistes, peuvent être préjudiciables à la stabilité de l'excavation, comme figuré par les traits en pointillé rouge. Outre la stratification et la schistosité, d'autres discontinuités tectoniques défavorables peuvent être présentes.

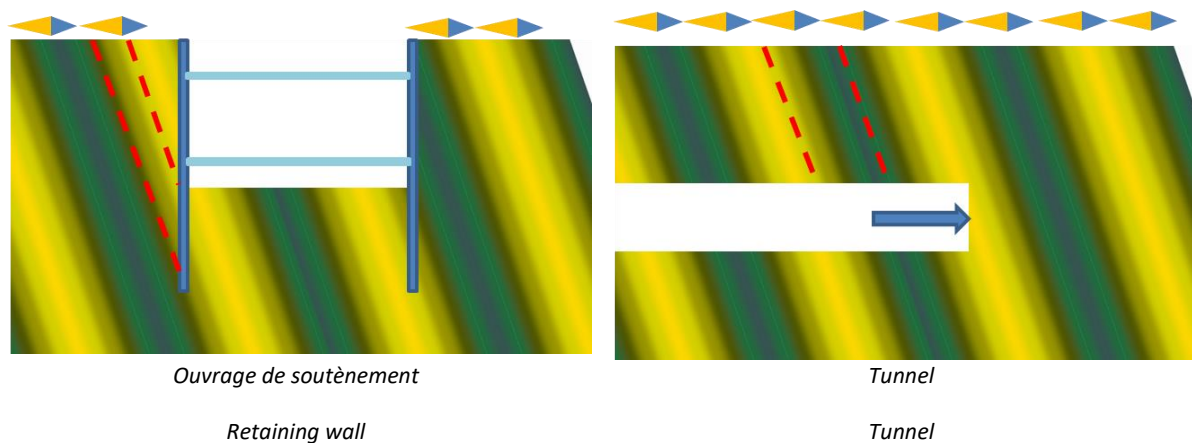


Figure 33 : Impact du contexte géologique sur les propriétés du massif et les ouvrages. Les polygones jaunes et bleus figurent les séquences stratigraphiques.

Figure 33: Impact of the geological context on the properties of the rock-mass and the structures. The yellow and blue polygons represent the stratigraphic sequences.

Conclusions

Les terrains de l'agglomération rennaise sont variés. Les travaux de génie civil excavent principalement des matériaux du Briovérien dont la faible résistance les classe en SIRT (Sols indurés et roches tendres). Leur histoire géologique : dépôt suivi d'une phase de déformation avec un faible métamorphisme, puis d'une altération tropicale "récente" et finalement d'une érosion explique leur hétérogénéité et leur anisotropie. Elle permet également de comprendre les fortes variations latérales de propriétés mécaniques, parfois sur des distances décimétriques, en revanche cela rend difficile la prédictibilité de la qualité mécanique des terrains que l'on va rencontrer dans un nouveau chantier.

Les difficultés d'échantillonnage des SIRT nous ont conduits à développer des essais spécifiques pour qualifier la matrice rocheuse et les discontinuités. Les essais de compression ont montré des variations fonction du faciès, mais aussi une forte influence de l'altération et de la teneur en eau. Globalement, leur résistance et leur déformabilité sont fonction de la masse volumique du matériau qui est un indicateur simple à mesurer. Les matériaux du Briovérien rennais sont anisotropes, avec une anisotropie croissante depuis les grès vers les siltites.

Mis à part la masse volumique, il est difficile de trouver d'autres indicateurs quantitatifs, simples et pertinents, permettant d'apprécier rapidement les caractéristiques mécaniques à partir des échantillons extraits des campagnes d'investigations géotechniques. Il est donc important de bien identifier visuellement les matériaux (siltite, schistes graphiteux, schistes gréseux, grès, etc.) et de les situer, si possible, dans la séquence sédimentaire.

La synthèse des propriétés de matrice et des discontinuités proposée ci-dessus contribue à apprécier la qualité du massif rocheux, mais cette dernière nécessite également de bien connaître la répartition des différents faciès dans les travaux. L'anisotropie du massif rocheux peut dans certains cas conditionner le comportement d'ouvrages. Cette anisotropie peut être due à l'anisotropie de la matrice rocheuse ou être une anisotropie structurale liée aux variations de propriété des matériaux constituant les différentes couches ou encore aux discontinuités, et notamment à la schistosité.

Les variations de faciès étant changeants d'un site à l'autre et, sur un même site, très rapprochées, il est important d'effectuer pour chaque chantier de bonnes observations géologiques pour identifier les faciès présents.

Hommage à Marie-Pierre Dabard

Les auteurs tiennent à rendre hommage à la mémoire de Marie- Pierre Dabard, Maître de Conférences à Géosciences Rennes qui a largement contribué à l'analyse et la compréhension de la géologie du Briovérien du bassin rennais pendant une dizaine d'années de collaboration fructueuse et amicale.

Bibliographie

BRGM, 2021, <https://infoterre.brgm.fr/> site web dernière consultation le 22/06/2021

ASTM, 2010, Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method, D7625-10, may 2010

AFNOR, 2000. Roches - Détermination du pouvoir abrasif d'une roche - Partie 1 : essai de rayure avec une pointe, norme NF P94-430-1, Octobre 2000.

AFNOR, 2000, Roches - Détermination du pouvoir abrasif d'une roche- Partie 2 : essai avec un outil en rotation, norme NF P94-430-2, Octobre 2000

AFTES, 2003. GT1R1F1 - Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains, *Tunnel et ouvrages souterrains* 177: 138-186.

CFGI-CFMR-CFMS, Cojean R., Doré M., Fabre D., Ghoreychi M., Kazmierczak J.-B., Merrien-Soukatchoff V., Piguet J.-P., Ropers F., Serratrice J.—F., Tisot J.-P. et You T. 2005. Note sur la définition des "Sols Indurés Roches Tendres" (SIRT). *Revue Française De Géotechnique* 111: 59-66.

Dabard M.P., 2015. Géologie du bassin Rennais, *rapport interne Géosciences Rennes*.

Dabard M.P., 1990. Lower Brioverian formations (Upper Proterozoic) of the Armorican Massif (France): geodynamic evolution of source areas revealed by sandstone petrography and geochemistry. *Sedimentary Geology* 69: 45-58.

Guiheneuf S., Rangeard D., Merrien-Soukatchoff V. et Dabard M.-P., 2018a. Caractérisation des plans de discontinuités des schistes du Briovérien de la région de Rennes. JNGG 2018 - 9èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - Ressources et aménagement : quelles limites ? Marne-la-Vallée. <https://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AII3/>. 8 p.

Guiheneuf S., Rangeard D., Merrien-Soukatchoff V. et Dabard M.-P., 2018b. Characterization of shear behaviour of discontinuities of brioverian schist. International European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2018, St Petersburg, Russia. 275-280.

Jafari M. K., Pellet F., Boulon, M. et Hosseini K. A., 2004. Experimental Study of Mechanical Behaviour of Rock Joints Under Cyclic Loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37(1): 3-23.

Le Cor T., 2014. Étude du comportement mécanique des terrains anisotropes lors de travaux de génie civil. Thèse soutenue le 25/11/2014, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Rennes, 314 p.

Le Cor T., Larcher, N., Merrien-Soukatchoff V., Rangeard D., Takarli M., et Simon J., 2014. Caractérisation de matériaux anisotropes par mesures de vitesse d'ondes ultrasonores. JNGG 2014 (Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur), Beauvais.

Le Cor T., Larcher N., Rangeard D., Merrien-Soukatchoff V. et Takarli, M., 2013. Caractérisation minéralogique et mécanique des schistes briovériens. 31es Rencontres universitaires de l'AUGC, Cachan.

Le Cor T., Merrien-Soukatchoff V., Rangeard D., Rescourio C. et Simon J., 2014, Comparisons of different modelling of an excavation realized in fractured and weathered rocks. Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2014), 18-20 June 2014, Delft, The Netherland.

Le Cor T., Merrien-Soukatchoff V., Rangeard D. et Simon J., 2012. Modélisations d'une excavation soutenue dans un terrain anisotrope schisteux. JNGG 2012 - Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (Espaces Urbains, Ruraux, Souterrains et Littoraux), Bordeaux.

Le Cor T., Rangeard D. et Merrien-Soukatchoff V., 2012. Caractérisation minéralogique et mécanique des schistes briovériens. Journées AUGC 2012, Chambéry, France.

Le Cor T., Rangeard D., Merrien-Soukatchoff V. et Simon J., 2013. Physical and mechanical characterization of weak schistose rocks. Eurock 2013: Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment, 21-26 September 2013. Wroclaw, Poland.

Le Cor T., Rangeard D., Merrien-Soukatchoff V. et Simon J., 2014,). Mechanical characterization of weathered schists. IAEG XII Congress - Engineering Geology for Society and Territory, September 15th-19th, 2014, Torino, Italy.

Le Cor T., Rangeard D., Merrien-Soukatchoff V. et Simon J., 2015. Mechanical Characterization of Weathered Schists. In Lollino G, Giordan D, Thuro K, Carranza-Torres C, Wu F., Marinos P. et Delgado C. (Eds.), Engineering Geology for Society and Territory - Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects: 809-812. Springer International Publishing.