

EMPLOI POUR LES TERRASSEMENTS DE SOLS FINS SUPPOSES INAPTES AU TRAITEMENT – ETUDES DES ALTERITES DE SCHISTES DE LA REGION BRETAGNE-PAYS DE LOIRE.

T. LENOIR, D. BOEDENES, J.P. DAVIS, E. RAYSSAC & J.C. AURIOL
Department Earthworks and Earth Structures, IFSTTAR, France
thomas.lenoir@ifsttar.fr

RÉSUMÉ

Les sous-sols ligériens et bretons français ont une histoire géologique complexe où des matériaux sédimentaires côtoient des roches magmatiques et métamorphiques. Ainsi, on rencontre fréquemment des altérites de séricitoschistes et de micaschistes qui résultent de l'altération, sous l'effet des contraintes climatiques, de terrains primaires partiellement métamorphisés. Ces sols fins, dont le comportement est régi par la fraction argileuse, sont considérés comme inutilisables pour les terrassements, car impropres au traitement selon les spécifications des normes françaises. Pourtant, conformément aux politiques de Développement Durable, la valorisation et l'emploi de ces ressources demeurent indispensables pour la réalisation de grands projets d'infrastructures régionaux (routes, aéroport, lignes ferroviaires...).

Heureusement, les observations à l'échelle du laboratoire montrent que sous certaines conditions de cure, les performances mécaniques et la sensibilité à l'eau de ces matériaux traités avec du ciment progressent favorablement avec le temps.

Par ailleurs, les densités calculées à l'optimum Proctor des matériaux non traités permettent de corrélérer, à la fois les spécificités géotechniques, les observations physico-chimiques, et les propriétés mécaniques. L'ensemble de ces observations ouvrent des perspectives quant à l'utilisation possible des altérites traitées lors des chantiers de terrassement sous réserve de prescriptions bien particulières lors de leur traitement et de leur mise en œuvre.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de l'application des politiques de Développement Durable, les nouveaux projets d'infrastructures présentant un caractère d'intérêt public se doivent d'être respectueux de l'Environnement. L'utilisation des sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques est une solution efficace pour rationaliser les impacts économiques et environnementaux des projets. Le traitement des sols permet la valorisation de matériaux médiocres ainsi que la préservation et l'optimisation des ressources naturelles nobles en granulats. Enfin en limitant les flux de matériaux, il induit la réduction des nuisances au tiers et les émissions de CO₂.

Cette technique est largement utilisée dans les domaines du Génie Civil [1-4]. En matière de terrassements, en France, elle est entièrement régie par le GTR, le Guide français des Terrassements Routiers [5] et par le GTS, le Guide du Traitement des Sols [6]. Or au sens de ces références, certains matériaux sont définis comme étant impropres au traitement, l'un des facteurs prépondérant de cette qualification étant la sensibilité à l'eau des matériaux traités. C'est le cas en particulier des altérites de micaschistes et de séricitoschistes qui sont fréquemment rencontrées dans les sous-sols ligériens et bretons [7-8]. L'impossibilité d'utiliser ces matériaux est un frein majeur à la réalisation des grands projets structurant du grand Ouest français (aéroport, lignes à grande vitesse...).

Le comportement mécanique des sols composés d'altérites de micaschistes est similaire à celui d'un sol argileux. Les performances mécaniques obtenues sont souvent médiocres

car ces sols sont plus ou moins sensibles à l'eau suivant la nature des phases en présence.

L'objet de cet article est d'une part d'essayer de lier les observations physico-chimiques, les spécificités géotechniques et les propriétés mécaniques des altérites de micaschistes de manière à identifier les paramètres qui influent sur leurs performances géotechniques, et d'autre part de montrer que l'évolution des performances de ces matériaux traités avec des ciments normalisés ouvrent des perspectives quant à une utilisation possible de ces ressources lors des chantiers de terrassement.

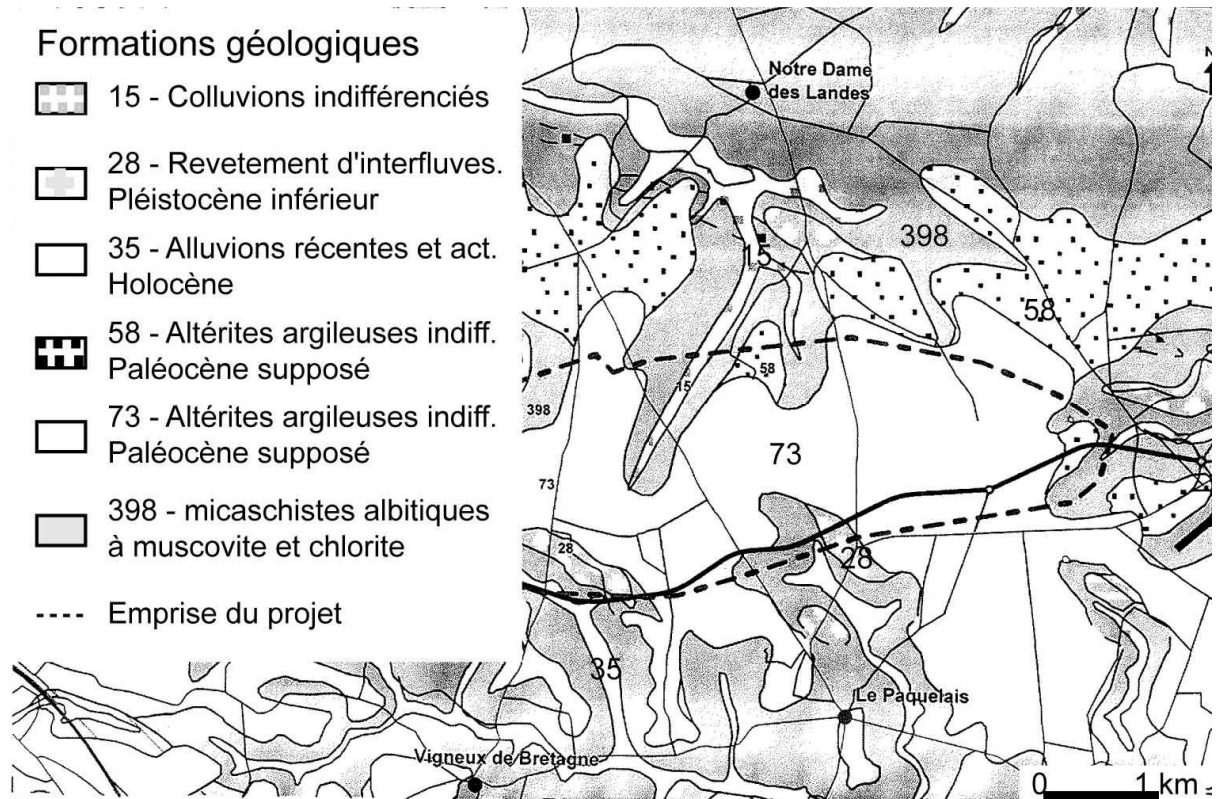


Figure 1 : Carte géologique de la zone d'étude (CETE-Ouest 2009)

2. DONNEES GEOLOGIQUES

La zone d'étude se situe dans le département de Loire Atlantique, au nord de Nantes. La carte géologique (fig. 1) du secteur indique la succession stratigraphique suivante :

- des recouvrements de plateau constitués de limons, de cailloutis et d'argiles d'épaisseur irrégulière et discontinue d'épaisseur en général inférieure à 1,00 m ;
- de dépôts de sables et graviers du Pliocène marin, très ponctuels et rares mais pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur;
- le substratum constitué de formation du socle armoricain, les micaschistes albitiques représentant le terme le moins métamorphique et le plus et le plus rétomorphisé de la structure anticlinale qui enveloppe le massif granitique de Vigneux-Orvault [9].

Les micaschistes sont des roches métamorphiques, formées par la recristallisation de roches sédimentaires. Ils sont principalement constitués de micas, de quartz et de plagioclases (feldspaths). Avec la biotite, la muscovite est le minéral le plus courant du groupe des micas. En climat tempéré et humide, son altération est modérée. Sa fragmentation donne des petites paillettes de même composition chimique appelées séricites et son altération chimique, par perte d'un ion potassium donne de l'illite. Suivant les conditions de drainage du milieu, l'altération de l'illite produit alors soit de la vermiculite puis de la kaolinite par lessivage soit des smectites en milieu confiné [10-14].

Les micaschistes de Loire-Atlantique sont des roches cristallophylliennes dérivant de terrains paléozoïques. Il s'agit de micaschistes albitiques à micas blancs, chlorites et localement grenats. La sédimentation originelle est assez variée, essentiellement détritique et volcano-sédimentaire. Les faciès de micaschistes sont assez monotones. On observe de nombreux horizons lenticulaires, riches en grenats automorphes et en albite. La roche est riche en quartz, albite et mica blanc mais est dépourvue de passées graphiteuses [9].

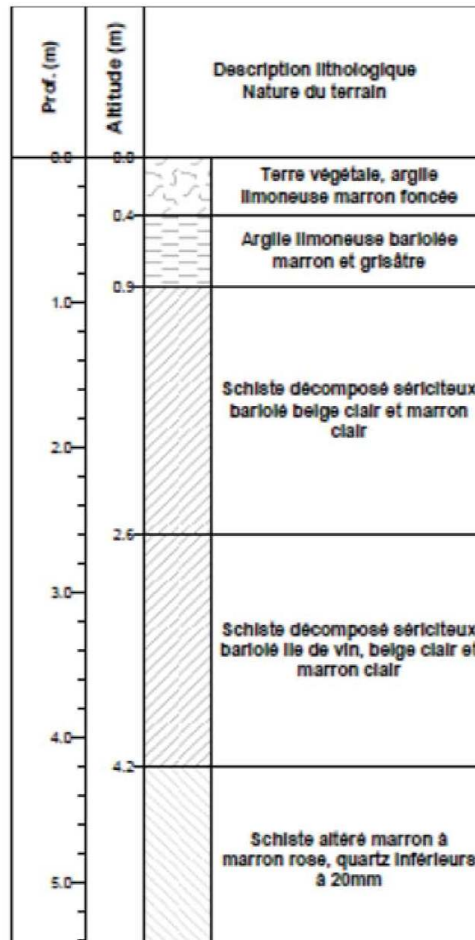


Figure 2 : Profil lithologique typique de la zone d'étude.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Dans le cadre d'un projet de construction d'une importante infrastructure s'étendant sur plusieurs dizaines d'hectares, six matériaux (LCPC1, LCPC2, LCPC3, LCPC4, T100 et T31) représentatifs de la zone d'étude ont été prélevés au tractopelle mécanique. Le profil typique des prélèvements est indiqué sur la figure 2.

3.1. Identification physico-chimique

3.1.1 Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Les observations ont été réalisées avec un MEB Hitachi S570 équipé d'un Xflash silicon drift detector Bruker pour les analyses dispersives en énergie (EDX). Les images ont été enregistrées en mode électron secondaire et la tension d'accélération a été de 15keV.

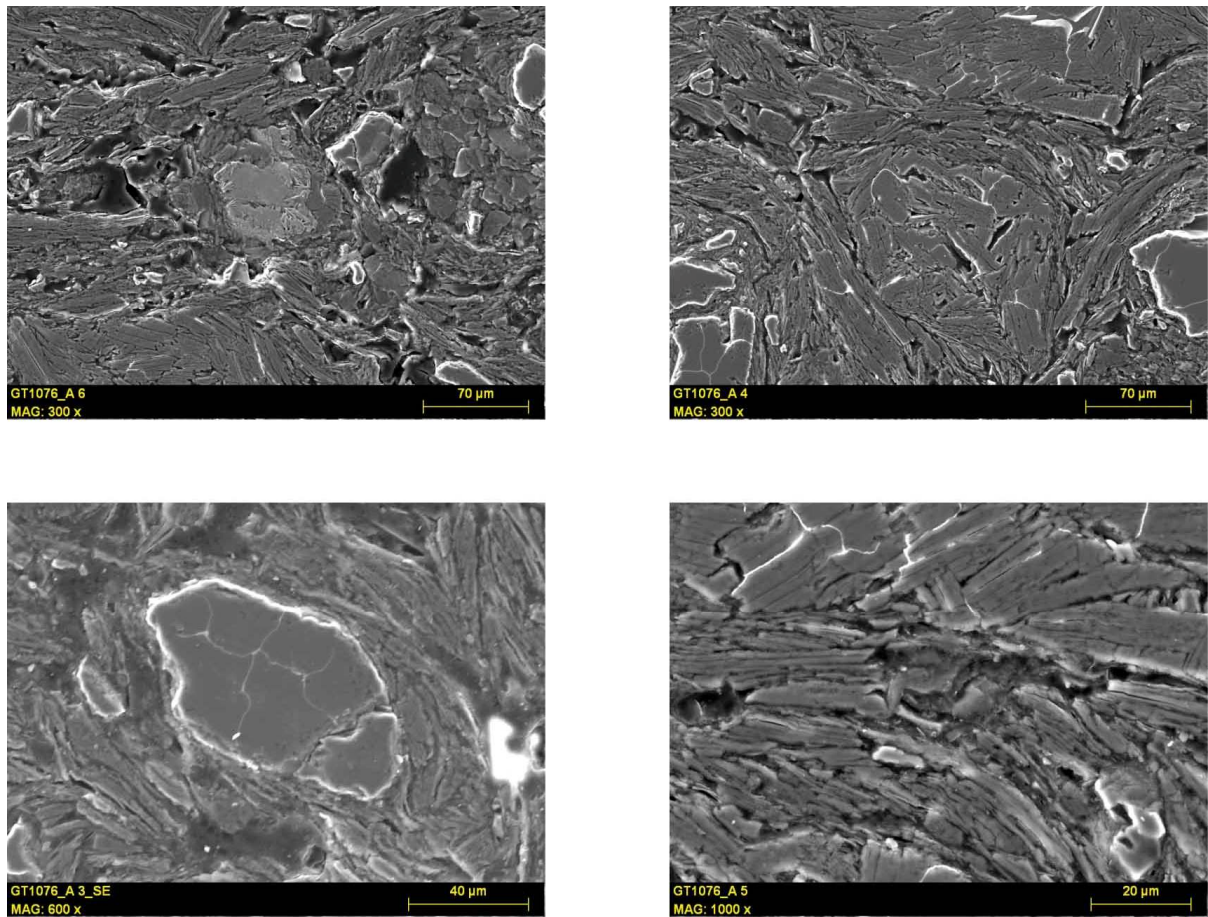
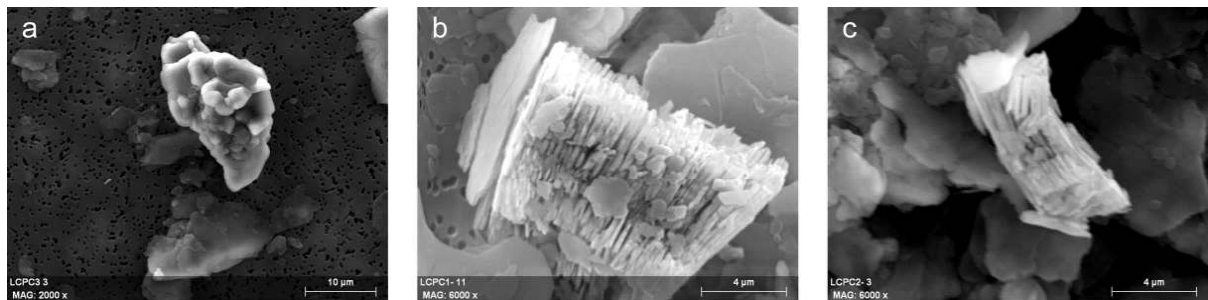


Figure 3 : Images MEB des matériaux LCPC1 à gauche et LCPC2 à droite. Les clichés du haut montrent une vue d'ensemble des matériaux, tandis que les clichés du bas sont focalisés sur des zones plus restreintes.



Spectres	Teneur en Oxydes (%)					
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	FeO
a	1.03	2.58	95.13	0.65	0.16	0.45
b	0.12	44.99	52.99	0.92	0.23	0.75
c	0.13	5.99	7.35	1.43	84.03	1.07
Sp. moy.	1.49	35.72	48.06	11.23	0.70	2.79

Figure 4 : Images MEB obtenues sur les poudres des matériaux et teneurs en oxydes associées. La lettre des spectres dans le tableau est associée à l'image MEB correspondante. Le spectre « Sp. Moy. » correspond à la moyenne de l'ensemble des analyses EDX. Ces analyses montrent un coefficient de corrélation entre la teneur en K₂O et FeO de 82%.

Dans un premier temps, des clichés ont été faits sur les matériaux compactés à l'optimum Proctor puis lyophilisés et imprégnés de résine, à une échelle assez grande, pour caractériser la morphologie des matériaux (fig. 3).

Dans un second temps, des clichés ont été faits sur des poudres à une échelle plus fine pour essayer de localiser des structures intéressantes (fig. 4). Une analyse dispersive en énergie (EDX) a également été réalisée sur une dizaine de structures de manière à déterminer leur composition chimique.

3.1.2 Diffraction des rayons X

La nature des phases minérales présentes dans les différents échantillons de sols a été déterminée par diffraction des rayons X. Les analyses ont été faites avec un diffractographe AXS D8 Advance X-ray de Brucker avec une anticathode cuivre émettant la longueur d'onde $K\alpha_{Cu}=1.54 \text{ \AA}$, sur des poudres et des lames orientées. Les diffractogrammes sont présentés à la figure 5.

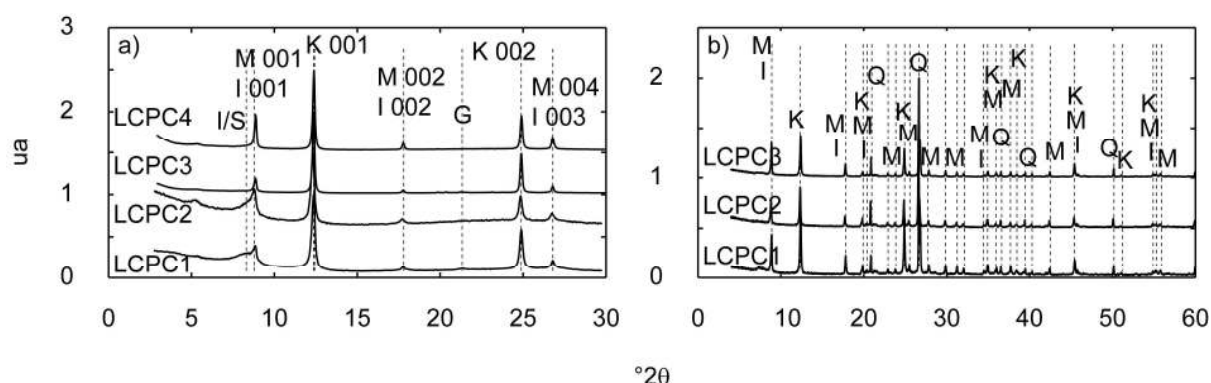


Figure 5 : Diffractogrammes X de lames orientées des matériaux LCPC 1 à 4, fractions 0-2 μ m (a) et de poudre des matériaux LCPC1 à 3 (b). K signifie kaolinite, M, muscovite, I, illite Q, quartz et dans a), I/S, interstratifié Illite/Smectites et G, goethite. Le nombre 00l correspond à l'identification de la raie de diffraction. Dans le cas de l'interstratifié, il s'agit simplement d'une supposition et donc les raies n'ont pas été identifiées. En a), les raies ont été normalisées par rapport à la raie 001 de la kaolinite ($2\theta=12.37^\circ$) et en b), par rapport à la raie 011/101 du quartz ($2\theta=26.65^\circ$).

3.1.3 Analyses chimiques

Des analyses chimiques ont été faites pour aider à la détermination précise des phases présentes dans les sols. Elles ont été réalisées sur des solutions résultant de la minéralisation des échantillons par attaque acide [15]. Pour la quantification du silicium, il a été appliqué une fusion alcaline au tétraborate de Lithium. Les résultats synthésés et normalisés sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques de la fraction 0-0.315 mm des matériaux LCPC 1 à 4

	Oxydes (%)				
	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	K ₂ O
0-0.315mm					
LCPC1	1.04	28.96	2.02	62.36	5.62
LCPC2	0.87	25.38	1.15	67.60	5.00
LCPC3	0.87	27.38	1.18	65.39	5.18
LCPC4	0.43	29.30	2.09	62.13	6.05

3.2. Caractéristiques géotechniques

L'analyse granulométrique a été effectuée sur les différents échantillons par tamisage à sec après lavage [16] et par sédimentation [17]. Les courbes granulométriques sont présentées à la figure 6.

Les valeurs au bleu de méthylène (VBS) et les limites de liquidité (W_L) ont été déterminées suivant les normes françaises en vigueur [18-19].

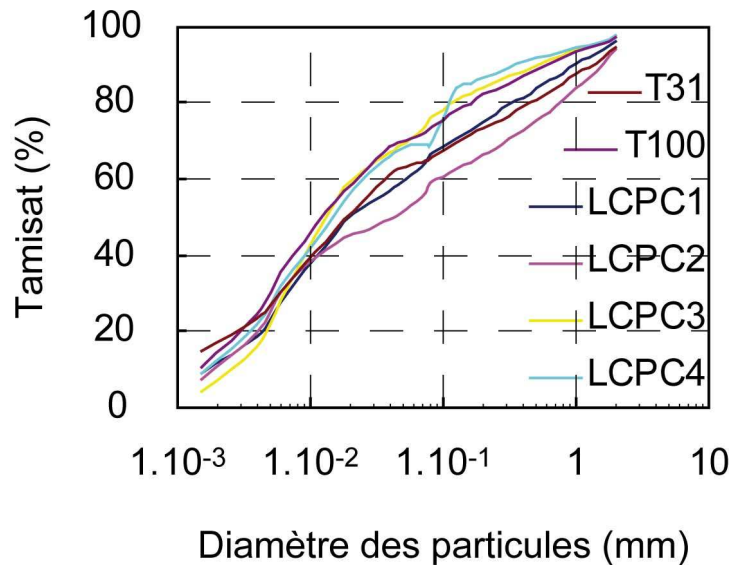


Figure 6 : Analyse granulométrique sur la fraction 0-2 mm des sols LCPC1 à 4, T100 et T31

Les densités sèches maximales (ρ_{OPm}) et teneurs en eau optimales (W_{OPm}) en utilisant un essai dit 'mini-Proctor', basé sur le principe de l'essai Proctor mais permettant d'utiliser des quantités de matière moins importante [20].

Les résultats des caractéristiques géotechniques obtenues sont synthétisés au tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques géotechniques des échantillons LCPC 1 à 4

N°	Argile	Limon	Sable	Sable	W_L	VBS	ρ_{OPm}	W_{OPm}
	(0-2 m)	(2-20 m)	Fin	Grossier				
	%	%	(20-200 m) %	(0.2-2mm) %	%	g/100g _{sol sec}	g/cm ³	%
LCPC1	9.26	39.34	26.43	21.30	41.00	0.5	1.71±0.02	15.85±3.13
LCPC2	7.59	36.91	21.83	27.76	36.20	0.4	1.82±0.01	13.39±2.42
LCPC3	4.10	53.52	26.44	13.73	39.70	0.3	1.64±0.01	17.89±2.78
LCPC4	8.87	46.26	32.42	10.92	38.00	0.4	1.68±0.01	17.25±2.09
T100	10.85	45.82	25.50	15.08	nc	nc	1.70±0.01	17.93±1.43
T31	14.85	34.27	24.39	21.11	nc	nc	1.83±0.00	16.08±0.84

3.3. Performances mécaniques

Les échantillons ont été traités avec 5% de ciment CEM I [21] et conditionnés sous la forme d'éprouvettes cylindriques de 5cm de diamètre et de 10 cm de hauteur compactées aux densités mini-Proctor des matériaux traités. On appelle délai de cure T_c , la période pendant laquelle les éprouvettes ont été conservées à 20° avant essais.

Des mesures de résistance en compression simple à déplacement imposé ($v=1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) ont permis de déterminer le comportement rhéologique, les modules élastiques E et les valeurs de résistance à la compression en fonction de T_c [22]. Les mesures en compression ont été faites pour des délais de cure variant de 1 jour à 1 an.

L'influence de l'eau a également été étudiée sur ces matériaux traités avec 5% de CEMI. Les matériaux ont ainsi subi un délai de cure de 4h, 1jour, 12 à 16 jours, et 28 à 35 jours, avant d'être plongé en immersion durant un mois environ. A l'issue de cette immersion, le gonflement des éprouvettes et leur résistance à la compression simple ont été déterminés.

4. RÉSULTATS

4.1. Identification physico-chimique

L'analyse des images de la figure 3 sur les matériaux naturels compactés à la densité ρ_{OPm} montre la présence de gros grains polyédriques entourés de feuillets orientés. Il s'agit probablement de grains de quartz enrobés par des fines ou des feuillets d'argiles. Les analyses EDX associées avec les images sur poudre (fig. 4) permettent de mettre immédiatement en évidence trois phases : le quartz (SiO_2), le rutile (TiO_2) et la kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). Au delà, la présence de manganèse et de potassium laisse supposer la présence de chlorite et de muscovite. Néanmoins, sur l'ensemble des analyses EDX, le coefficient de corrélation entre les pourcentages de teneur en oxyde de fer et en oxyde de potassium est égal à 82%, ce qui peut signifier la présence d'illite. L'ensemble de ces phases est couramment détecté lors de l'étude de sols résultants de l'altération de matrices métamorphiques [23-24].

La diffraction des rayons X sur les lames orientées (fig. 5) montre que les phases argileuses des sols sont les mêmes pour tous les quatre échantillons testés. Les pics de diffractions des raies 00l montrent la présence de kaolinite, d'un mica et d'une phase mal déterminée. Les pics du mica peuvent être attribués soit à une muscovite soit à une illite. En ce qui concerne la phase indéterminée, il peut éventuellement s'agir d'un complexe argileux interstratifié illite/smectite [23].

Peu d'informations complémentaires sont disponibles avec les diffractogrammes de poudre. Les informations sont écrasées par l'intensité de la raie principale du quartz. On peut néanmoins écrire que toutes les raies sont expliquées avec les phases quartz, illite, muscovite et kaolinite.

A partir des teneurs en oxydes de l'analyse chimique (Tableau 1), il a été tenté de quantifier les phases minérales présentes dans les sols. Les minéraux sélectionnés ont été la muscovite $KAl_2Si_3AlO_{11}.H_2O$, l'illite $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$, la kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ et le quartz, SiO_2 . Les résultats les plus cohérents ont été obtenus avec de la muscovite, de la kaolinite et du quartz. Aucun essai de quantification comprenant de l'illite n'a été véritablement satisfaisant, probablement car cette phase est présente en assez faible quantité dans les matrices. Les résultats sont donnés dans le tableau 3. L'ensemble des phases (oxyde de fer, interstratifié illite/smectite) n'ayant pas été identifié, ces quantités bouclent autour de 97%. Pour les quatre matériaux, les rapports kaolinite/muscovite sont compris entre 0.4 et 0.6. Ces remarques amènent à conclure que les argiles des sols LCPC1 à 4 sont constituées de 2/3 de micas (muscovite et/ou illite) et de 1/3 de kaolin.

Tableau 3 : Quantifications des phases minérales présentes dans la fraction 0-0.315mm des échantillons LCPC 1 à 4

	mica	kaolinite	Quartz
LCPC1	45%	23%	28%
LCPC2	40%	20%	38%
LCPC3	42%	23%	33%
LCPC4	49%	21%	27%

4.2. Identification géotechnique

En ce qui concerne la fraction 0-2mm, le tamisat cumulé à 80 μ m est supérieur à 35% (fig. 6). La dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol est inférieure à 50 mm (D_{max}). Le tableau 1 montre que les répartitions granulométriques de la partie 0 à 80 μ m sont légèrement différentes suivant les matériaux (56 à 74 %) et les variations des quantités d'argiles (<2 μ m) faibles (4 à 16.0 %).

Les valeurs au bleu sont comprises entre 0.2 et 1.5. Ces sols présentent donc une sensibilité certaine à l'eau. Ils ont classés A1 au sens du GTR [5].

Les valeurs des limites de liquidité sont de l'ordre de 40%, ce qui indique un potentiel risque de gonflement des matériaux.

Les densités mini Proctor sont comprises entre 1.64 et 1.83 t.m⁻³. Elles sont donc assez variables selon les échantillons. En ce qui concerne les incertitudes sur ces valeurs, elles sont de l'ordre de 0.01 t.m⁻³ et sont donc relativement faibles. Les teneurs en eau à l'optimum sont également très variables, puisque comprise entre 13.39% pour LCPC2, et 17.93 % pour T100. Les incertitudes sur les teneurs en eau sont élevées puisque l'indétermination atteint 3.13% pour LCPC1. En traçant W_{OPm} en fonction de ρ_{OPm} , il semble qu'il existe une relation linéaire entre ces deux paramètres (fig. 7). Une telle relation a déjà été observée avec le Proctor Normal sur des marnes argileuses [25] et sur des sols argileux [26]. De la même manière, il semblerait qu'il existe une relation entre W_L et ρ_{OPm} (fig. 7). Encore une fois, cette anti-corrélation entre la densité Proctor et la limite de liquidité est assez classique dans le cas des matériaux argileux [25-27] et confirme que le comportement mécanique général des altérites de micaschistes est bien similaire à celui de sols argileux.

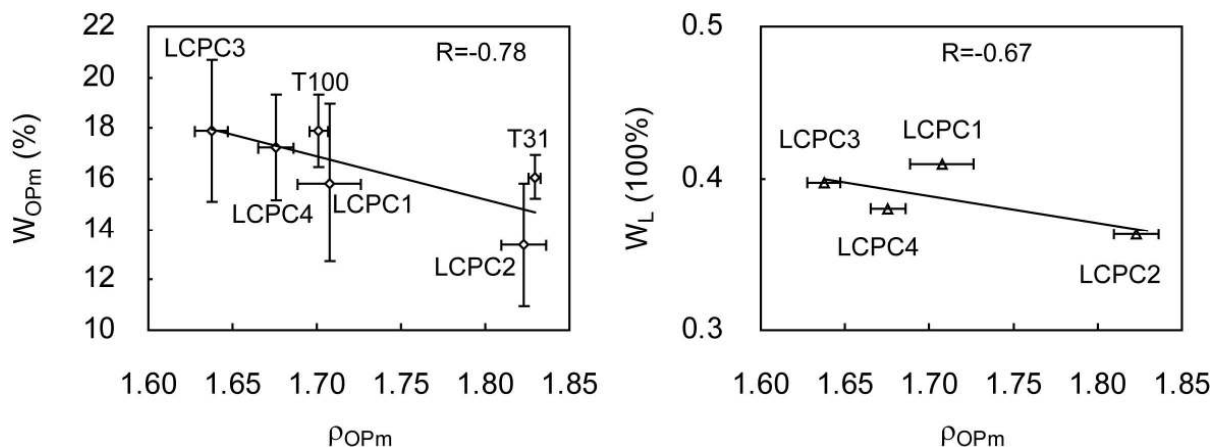


Figure 7 : a) Corrélation entre la densité mini Proctor ρ_{OPm} et la teneur en eau à l'optimum W_{OPm} . b) Corrélation entre la densité Proctor et la limite de liquidité.

4.3. Résultats mécaniques

4.3.1 Influence du délai de cure T_c

La courbe contrainte-déformation de la figure 8 montre que les matériaux traités avec 5 % de CEM1 suivent une loi rhéologique classique [28]. On constate une première phase linéaire 'pseudo-élastique' de module E , puis la pente diminue jusqu'au pic de rupture de l'éprouvette. Dans les premiers temps du traitement on peut remarquer un comportement ductile qui disparaît au fur et à mesure. Le matériau devient de plus en plus fragile au sens mécanique (apparition d'un plan de glissement à la rupture). La valeur de la résistance maximale q_u à la compression augmente avec le délai de cure (T_c) suivant une relation semi-logarithmique. Par matériaux, la valeur des coefficients de détermination entre q_u et $\ln(T_c)$ est excellente (LCPC1 : 96% ; LCPC2 : 93% ; LCPC3 : 98% ; LCPC4 : 97% ;

T100 :85%). L'utilisation d'une relation linéaire entre q_u et $\ln(T_c)$ est donc une modélisation pertinente pour évaluer l'évolution des paramètres mécaniques de ces matériaux traités. Les relations sont détaillées au tableau 4. Cette observation est véritablement originale et mérite d'être soulignée puisqu'en général la résistance à la compression des matériaux atteint un maximum au bout d'un laps de temps inférieur à 100 jours [29-31]. Ces résultats montrent très clairement que les matériaux du site évoluent avec le temps et deviennent de plus en plus résistants. Des résultats similaires n'ayant, à notre connaissance, jamais été observés dans la littérature, il est difficile de les interpréter. Cependant, une des interprétations possibles serait que le ciment n'est pas réparti uniformément dans le matériau. Il agirait alors comme des « points de colle », points dans lesquels il serait mobilisé au fur et à mesure du temps suivant des processus de diffusion. En contact avec les argiles, dans un milieu basique, le calcium provoque la floculation des minéraux argileux [32]. Les composés cimentaires seraient dans un premier temps hydratés en périphérie des granules, les cimentant les uns aux autres, puis dans un second temps, les composés cimentaires résiduels se diffuseraient à l'intérieur des floccs pour assurer une prise plus homogène.

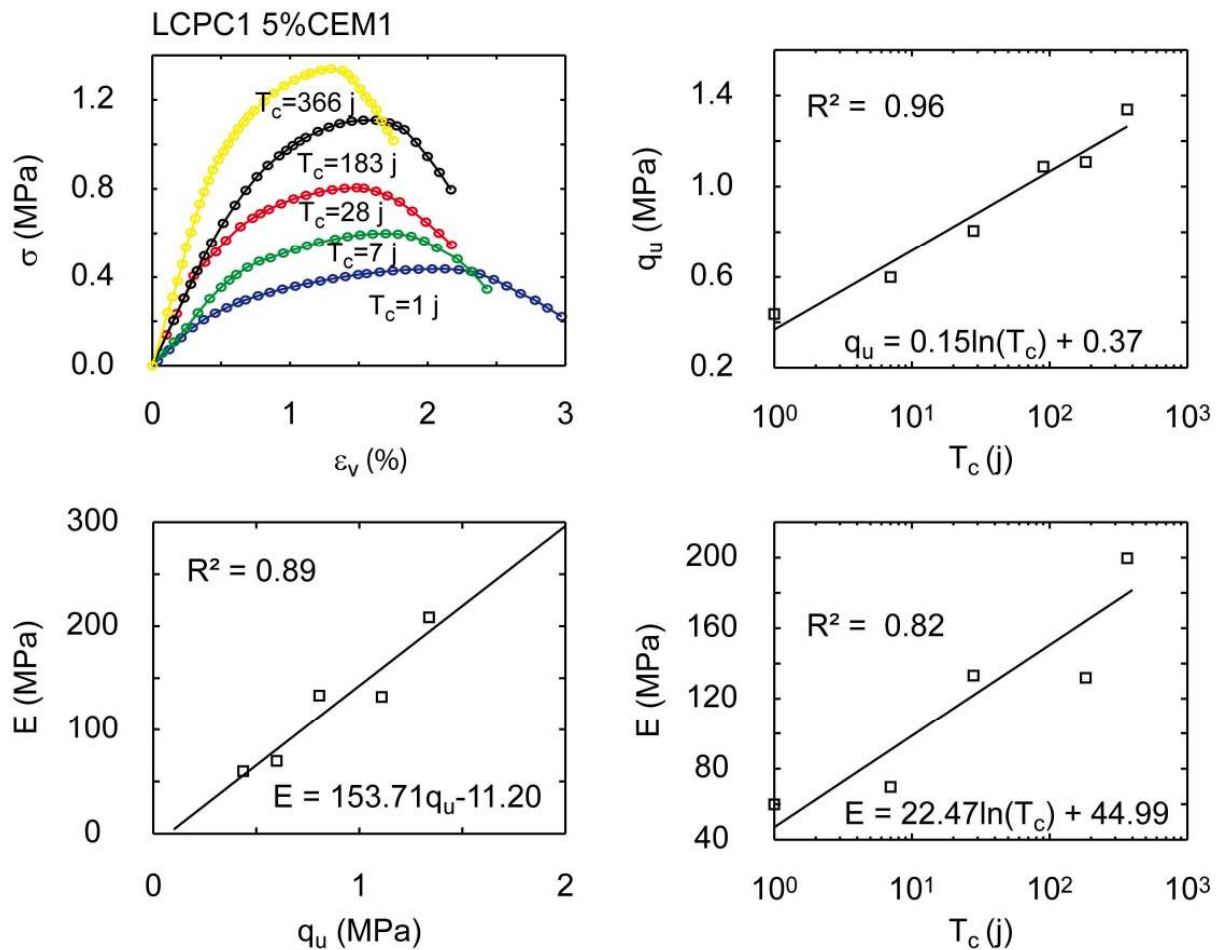


Figure 8 : En haut à gauche, détails des résultats expérimentaux des mesures de résistance à la compression (σ contrainte axiale et ε_v déformation verticale). En haut à droite, représentation de la relation semi-logarithmique qui existe entre la résistance maximale à la compression q_u et le délai de cure T_c . En bas à droite, valeurs du module tangent élastique E en fonction de $\ln(T_c)$. En bas à gauche, relation entre q_u et E .

La relation linéaire entre E et q_u (fig. 8) est assez classique [33-34] et logiquement, compte tenu de la relation entre q_u et $\ln(T_c)$, E est linéairement lié à $\ln(T_c)$.

Tableau 4 : Relations entre q_u et $\ln(T_c)$ suivant une loi du type $q_u = a \times \ln(T_c) + b$

	a	b	$R^2[q_u/\ln(T_c)]$
LCPC1	0.31	0.14	86%
LCPC2	0.28	0.52	91%
LCPC3	0.14	0.31	93%
LCPC4	0.08	0.40	97%
T100	0.11	0.56	85%

4.3.2 Conséquence de l'immersion

On remarque à la figure 9 que le gonflement moyen décroît en fonction du délai de cure des matériaux avant immersion. A 4h, le gonflement est supérieur à 10%, alors qu'à 15 jours il est inférieur à 1%. Ceci confirme bien que si les altérites traitées sont sensibles à l'eau au jeune âge, elles deviennent insensibles dès que le délai de cure avant immersion est suffisant.

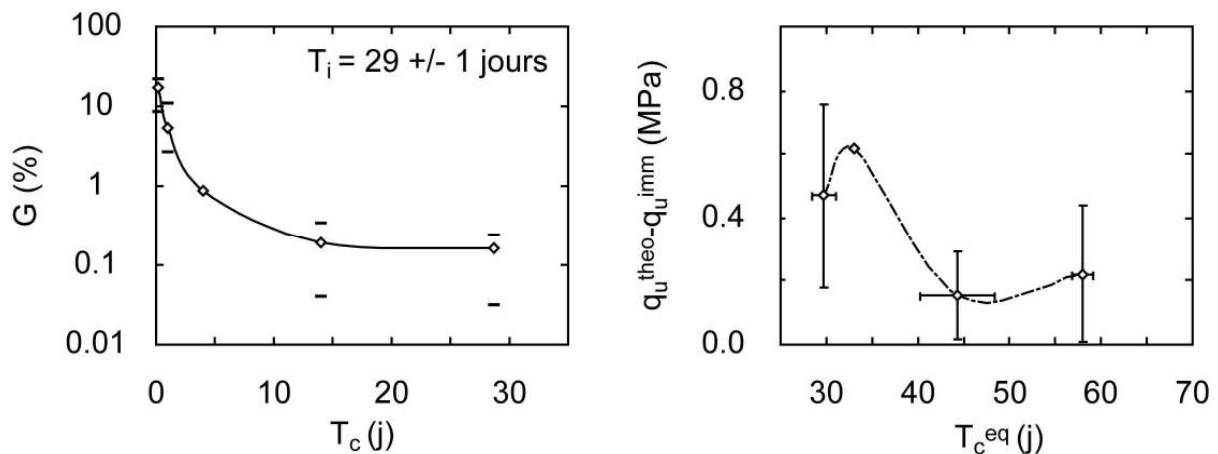


Figure 9 : A gauche, mesure du gonflement moyen pour les matériaux LCPC 1 à 4 traités avec 5% de CEM1 en fonction du délai de cure avant une immersion de 29 jours. Les barres supérieures représentent les valeurs maximales de gonflement obtenues pour un délai de cure donné et les barres inférieures, les valeurs minimales. A droite, mesure moyenne de la différence entre les résistances à la compression déterminées à partir des équations du tableau 4 (q_u^{theo}) et les résistances mesurées après l'immersion (q_u^{imm}). Le temps $T_{c,eq}$ est défini comme le délai de cure plus le temps d'immersion.

Concernant les performances mécaniques, celles des matériaux n'ayant subi que 4h de délai de cure avant immersion n'ont pu être mesurées compte tenu de l'absence totale de prise et du délitement naturel du matériau. En revanche, les performances mécaniques des matériaux ayant subi un délai de cure avant immersion supérieur à un jour ont pu être mesurées. A partir des équations liant q_u et T_c (Tableau 4), on a comparé par soustraction les performances mécaniques avec et sans immersion. En moyennant ces valeurs par délai de cure (fig. 9), on s'aperçoit que les matériaux qui n'ont subi qu'un jour de délai cure ($T_{c,eq} = 1$ jour de cure + 29 jours d'immersion) présentent des caractéristiques mécaniques moins bonnes que les matériaux n'ayant pas subi d'immersion. Quand le délai de cure augmente, la différence entre les résistances à la compression de matériaux immergés et non immergés diminue. Il semblerait que les matériaux soient légèrement moins résistants suite à l'immersion. Néanmoins, compte tenu de l'incertitude expérimentale il n'est pas véritablement possible d'être affirmatif et il est plus prudent de dire que les paramètres mécaniques ne sont pas fortement modifiés par la mise en immersion quand le délai de cure à l'air a été suffisamment long.

5. DISCUSSION

L'objet de cet article est d'essayer de comprendre quels sont les paramètres structuraux qui sont prépondérants dans la définition des caractéristiques mécaniques des altérites ligériennes traités. Pour cela, la densité ρ_{OPm} des différents échantillons a été comparée avec leur résistance maximale q_u à la compression à différent délai de cure (fig. 10). Il apparaît une corrélation entre cette densité mini Proctor et les performances mécaniques : plus la densité mini Proctor du matériau non traité est importante, plus la performance mécanique du matériau traité est élevée, quelque soit le délai de cure.

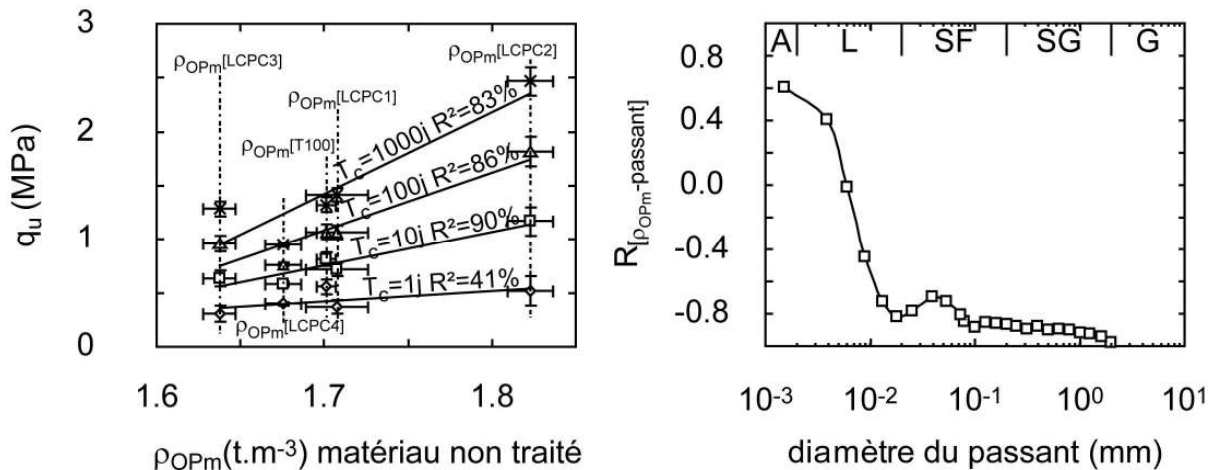


Figure 10 : A gauche, valeurs de résistance maximale à la compression des matériaux LCPC1 à 4 et T100 traités avec 5% de CEMI en fonction des densités Proctor des matériaux non traités. Les valeurs de q_u ont été calculées pour différents délais de cure ($T_c=1, 10, 100$ et 1000 jours) à partir des équations déterminées sur la figure A3. A droite, Valeurs des corrélations entre les valeurs ρ_{OPm} et les quantités de passants des fractions 0-2mm des matériaux LCPC1 à 4, T31 et T100. En haut de la figure, classification des sols suivant la dimension des particules, A pour argile, L pour limon, SF pour sable fin, SG pour sable grossier et G pour gravier.

De la même manière, en étudiant les corrélations qui existent entre les densités ρ_{OPm} des différents échantillons avec les courbes granulométriques (fig. 10), il apparaît clairement que la densité à l'optimum Proctor est en relation avec la quantité de particules dont le diamètre est supérieur à 0.02 mm. Plus cette fraction augmente, plus la densité est importante.

Ces deux résultats montrent donc que les valeurs maximales de résistance à la compression sont directement liées à la quantité de sable dans les sols. Plus cette quantité augmente, meilleures sont les performances mécaniques. Cette observation est cohérente, les particules grossières formant le squelette des matériaux.

Pour finir, il a été tenté de corrélérer les densités ρ_{OPm} des certains des matériaux avec les quantités des phases minérales déterminées lors de l'identification physico-chimique. En accord avec les constatations précédentes, les densités mini Proctor sont corrélées à hauteur de $R=0.67$ avec les quantités de quartz. Par ailleurs elles sont anti corrélées avec les quantités de kaolinite à hauteur de $R=-0.71$, ce qui tendrait à montrer que cette phase influe sur les performances mécaniques [35]. Néanmoins, ces derniers résultats sont à considérer avec précautions puisque les corrélations ont été calculées sur un nombre relativement faible d'échantillons.

6. CONCLUSION

En conclusion de ces travaux, il apparaît que les altérites de schistes, bien que définies comme des matériaux impropres au traitement suivant l'essai français d'aptitude au traitement [36], peuvent en réalité être traitées selon certaines conditions spécifiques. En particulier, quand ils sont traités, ce sont des matériaux dont la sensibilité à l'eau est fonction du délai de cure après le traitement. Plus ce temps augmente, plus les matériaux deviennent résistants, rigide et insensibles à l'eau.

Ces performances mécaniques sont à relier avec les quantités de particules dont le diamètre est supérieur à 20 μm présents dans les matériaux.

Il semble qu'elles dépendent également de la quantité de kaolinite, mais le nombre peu élevé d'observation amène à considérer ce résultat avec prudence. Cet aspect devra être confirmé en augmentant le nombre d'observation.

L'ensemble de ces résultats ouvrent donc des perspectives intéressantes quant à l'utilisation des altérites de micaschistes traitées dans des chantiers de terrassement en particulier s'il est possible de protéger les matériaux des arrivées d'eau extérieures (remontée de nappe, pluie...) dans les premiers jours suivants le traitement. Des planches d'essais à l'échelle du chantier doivent maintenant être menées pour savoir si les performances mécaniques finales seront compatibles avec les contraintes imposées par l'ouvrage.

7. REMERCIEMENTS

Les diffractogrammes X ont été enregistrés par Melle Delavernhe, doctorante à l'université de Nantes. Les analyses chimiques élémentaires ont été faites par Mr Demare, responsable des essais à la section PES du groupe GER. Ces personnes doivent être remerciées pour la qualité de leurs mesures qui ont permis l'élaboration de cet article.

RÉFÉRENCES

1. Al-Amoudi, O. S. B., Khan, K., and Al-Kahtani, N. S. (2010). "Stabilization of a Saudi calcareous marl soil." *Construction and Building Materials*, 24(10), 1848-1854.
2. Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., and Al-Sarmi, H. (2005). "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman." *Building and Environment*, 40(5), 681-687.
3. Bell, F. G. (1996). "Lime stabilization of clay minerals and soils." *Engineering Geology*, 42(4), 223-237.
4. Mbumbia, L., Mertens de Wilmars, A., and Tirlocq, J. (2000). "Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon." *Construction and Building Materials*, 14(3), 121-131.
5. SETRA-LCPC. (2000a). *Réalisation des remblais et des couches de forme*, SETRA, Bagnaux.
6. SETRA-LCPC. (2000b). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, SETRA, Bagnaux.
7. Estéoule-Choux, J. (1983). "Altérations et silifications au Tertiaire dans le Massif armoricain." *Geol. Fr.*, 345-352.
8. Esteoule, J., Esteoule-Choux, J., and Perret, P. (1972). "Etude des formations superficielles du Massif armoricain. Caractères distinctifs et passage des altérites et des dépôts tertiaires aux formations quaternaires." *Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne* IV(2), 97-106.
9. CETE-Ouest. (2009). "LCPC - Opération 11 L061 - Rationaliser les terrassements pour des ouvrages économes et durables". 1- Actions de recherche 2006-2008: Traitement des micaschistes de Notre Dame des Landes (44) - Etude des phénomènes de perturbation de prise." Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.
10. Duchaufour, P. (2001). *Introduction à la science du sol*, Dunod, Paris.
11. Jiang, W. T., and Peacor, D. R. (1991). "Transmission Electron-Microscopic Study of the Kaolinitization of Muscovite." *Clays and Clay Minerals*, 39(1), 1-13.

12. Kretzschmar, R., Robarge, W. P., Amoozegar, A., and Vepraskas, M. J. (1997). "Biotite alteration to halloysite and kaolinite in soil-saprolite profiles developed from mica schist and granite gneiss." *Geoderma*, 75(3-4), 155-170.
13. Morad, S. (1990). "Mica Alteration Reactions in Jurassic Reservoir Sandstones from the Haltenbanken Area, Offshore Norway." *Clays and Clay Minerals*, 38(6), 584-590.
14. Srodon, J. (1999). "Nature of mixed-layer clays and mechanisms of their formation and alteration." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 27, 19-53.
15. NF X31-147. (1996). "Qualité des sols - Sols, sédiments - Mise en solution totale par attaque acide." AFNOR, ed.
16. NF P94-056. (1996). "Sols: reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage." AFNOR, ed.
17. NF P94-057. (1992). "Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation." AFNOR, ed.
18. NF P94-052-1. (1995). "Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration." AFNOR, ed.
19. NF EN 933-9. (2009). "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essai au bleu de méthylène." AFNOR, ed.
20. Ferber, V. (2005). "Sensibilité des sols fins compactés à l'humidification - Apport d'un modèle de microstructure." Université de Nantes, Nantes.
21. NF EN 197-1. (2001). "Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants." AFNOR, ed.
22. XPC EN ISO/TS17892-7. (2005). "Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 7 : essai de compression uniaxiale sur des sols fins ", AFNOR, ed.
23. Allen, C. E., Darmody, R. G., Thorn, C. E., Dixon, J. C., and Schlyter, P. (2001). "Clay mineralogy, chemical weathering and landscape evolution in Arctic-Alpine Sweden." *Geoderma*, 99(3-4), 277-294.
24. Fagereng, Å., and Cooper, A. F. (2010). "The metamorphic history of rocks buried, accreted and exhumed in an accretionary prism: an example from the Otago Schist, New Zealand." *Journal of Metamorphic Geology*, 28(9), 935-954.
25. Shaqour, F. M., Jarrar, G., Hencher, S., and Kuisi, M. (2008). "Geotechnical and mineralogical characteristics of marl deposits in Jordan." *Environmental Geology*, 55(8), 1777-1783.
26. Fleureau, J. M., Verbrugge, J. C., Huergo, P. J., Correia, A. G., and Kheirbek-Saoud, S. (2002). "Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths." *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6), 1341-1357.
27. Sunil, B. M., Shrihari, S., and Nayak, S. (2009). "Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil." *Engineering Geology*, 106(1-2), 20-25.
28. Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., and Lee, F. H. (2004). "Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 696-706.
29. Al-Khaiat, H., and Haque, M. N. (1998). "Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete." *Cement and Concrete Research*, 28(6), 859-866.
30. Khatib, J. M. (2008). "Metakaolin concrete at a low water to binder ratio." *Construction and Building Materials*, 22(8), 1691-1700.
31. Yeh, I. C. (1998). "Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks." *Cement and Concrete Research*, 28(12), 1797-1808.
32. Rahman, M. M., Siddique, A., and Uddin, M. K. "Microstructure and Chemical Properties of Cement Treated Soft Bangladesh Clays." *Soils and Foundations*, 50(1), 1-7.
33. Corinaldesi, V. (2010). "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates." *Construction and Building Materials*, 24(9), 1616-1620.
34. Tugrul, A., and Zarif, I. H. (1999). "Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey." *Engineering Geology*, 51(4), 303-317.
35. Maubec, N. (2010). "Approche multi-échelle du traitement des sols à la chaux - Etudes des interactions avec les argiles," Université de Nantes, Nantes.
36. NF P94-100. (1999). "Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement." AFNOR, ed.