

Classification of weathering for granite and granite gneiss in South Korea

IK WOO¹, JEAN-ALAIN FLEURISSON² & HYUCK-JIN PARK³

¹ *Geohazard information Lab. Sejong University. (e-mail: ikwoo_2000@yahoo.com)*

² *CGI, Ecole des Mines de Paris. (e-mail: jean-alain.fleurisson@ensmp.fr)*

³ *Geohazard information Lab. Sejong Univ.. (e-mail: htpark@sejong.ac.kr)*

Abstract: A study on the weathering grade classification has been performed for granite and granite gneiss distributed in Korea. First, the qualitative classification criteria of weathering were reviewed and modified with field studies of the weathered rock masses. Thin section observations and XRD analyses for the different weathering grade rock samples showed the petrographical and petrophysical difference with respect to the weathering: the proportion of weathering-resistant minerals such as quartz and orthoclase have a tendency to increase with the development of weathering, while that of weathering-sensitive minerals such as anorthite and biotite decrease. The ranges of physical and mechanical rock properties were obtained with respect to the weathering grade from the laboratory rock tests and field tests for the studied rocks. Then, along with RDI_{sq} (Fookes et al. 1988), the weathering index Ia(Woo 2003) has been developed in this study to determine the weathering grade. Those two indices rely mainly on the water absorption ratio of rock and on the different rock strengths. The range of these weathering indices have been determined using the physical and mechanical rock properties that can be obtained from simple field or laboratory tests in 4 grades: Ia>7 for F, 3.5<Ia<10 for SW, 1.0<Ia<6.0 for MW and Ia<2.5 for HW. Consequently, the weathering index could be employed in order to classify quantitatively the rock weathering grade, specially for the studied granites and the granite gneiss in Korea.

Résumé: Une étude sur la classification d'altération a été effectuée sur les granites et les orthogneiss distribués en Corée du Sud. Premièrement, les critères qualitatifs pour la classification d'altération ont été étudiés et modifiés selon les études sur terrains sur les roches granitiques altérées. Les études sur les lames minces et sur la diffraction des rayons X pour les échantillons de roches de différents degrés d'altération montrent la différence pétrographique et pétrophysique vis-à-vis de l'altération : la proportion des minéraux résistants à l'altération tels que le quartz et l'orthoclase a la tendance d'augmentation au fur et à mesure du développement de l'altération, tandis que les minéraux sensibles à l'altération, tels que l'anorthite et la biotite se diminuent. La fourchette des caractéristiques physiques et mécaniques de roches a été obtenue en fonction du degré d'altération à partir des essais du laboratoire ou sur terrain. Nous avons développé l'indice d'altération Ia(Woo 2003) dans cette étude pour déterminer qualitativement le degré d'altération, avec RDI_{sq} (Fookes et al. 1988). Ces deux indices dépendent principalement du teneur en eau après immersion brutale et de la contrainte de roches. La fourchette de ces indices d'altération a été déterminée en utilisant les propriétés physiques et mécaniques de roches qui peuvent être obtenues des essais du laboratoire ou sur le : Ia>7 pour les roches saines F, 3.5<Ia<10 pour les roches légèrement altérées SW, 1.0<Ia<6.0 pour les roches moyennement altérées MW et Ia<2.5 pour les roches très altérées HW. Par conséquent, l'indice d'altération pourrait se servir à classer quantitativement le degré d'altération, en particulier pour les roches granitiques étudiées dans cette étude en Corée du Sud.

Keywords: weathering classification, Korea, weathering index, granite, gneiss

INTRODUCTION

L'état d'équilibre des massifs rocheux affleurants dépend d'un certain nombre de facteurs naturels ou artificiels de leur environnement. Ces facteurs sont les précipitations, la température, l'orientation de l'exposition des versants, les conditions hydrogéologiques, les modifications de l'état de contrainte (dus aux travaux, par exemple), l'environnement biologique ainsi que la pollution de l'atmosphère et des sols. Par conséquent, une roche peut être dégradée sous l'effet de ces différents paramètres et de leurs variations. Les conséquences de ces processus d'adaptation aux sollicitations naturelles ou artificielles peuvent être appelées « altération ». De nombreuses classifications de l'état d'altération d'une matrice rocheuse ou d'un massif rocheux sont disponibles. Elles sont toutes plus ou moins qualitatives et basées sur la description de l'état général de la roche par rapport à la même roche dans un état dit sain. La description porte sur le degré de décoloration, la modification de la structure, l'intensité et l'état du système de discontinuités, la dureté de la matrice etc... Bien que ce type de classification soit souvent subjectif, il est couramment utilisé en raison de sa simplicité et de sa rapidité de mise en œuvre sur le terrain. Une approche plus quantitative peut être aussi parallèlement utilisée pour compenser les défauts de la classification qualitative.

CLASSIFICATIONS DES ROCHES EN FONCTION DE LEUR ÉTAT D'ALTÉRATION

Moye (1955) et Ruxton et Berry (1957) ont respectivement classifié les états d'altération des carottes granitiques et du massif rocheux granitique à Hong-Kong. Puis, plusieurs auteurs (GSEG 1970,1977,1981,1990,1995 ; Fookes et Dearman 1971 ; Dearman 1976 ; Dearman *et al.* 1978 ; Irfan *et al.* 1978 ; ISRM 1981 ; Lee et de Freitas 1989) ont défini de quatre à sept classes pour les roches altérées, soit à l'échelle de la matrice soit à l'échelle du massif rocheux.

Nous adopterons pour notre étude la classification du profil d'altération de GSEG (1995), et celle de Lee et de Freitas (1989) qui, en particulier, concerne les granites coréens. Six classes y sont définies pour caractériser l'état d'altération de la roche : *F*, *SW*, *MW*, *HW*, *CW* et *RS*.

A l'échelle de la matrice rocheuse, la décomposition de la roche est le critère le plus important et la classification est basée sur la caractérisation des composants minéraux et sur les impacts subis. Les critères de classification de la matrice rocheuse *in situ* peuvent être les paramètres suivants : le degré de décoloration, la présence de la texture initiale de la roche, et la résistance (l'indice de rebond au marteau de Schmidt, la valeur de l'essai Franklin, la facilité à fragmenter le matériau à la main, au pied ou au marteau). Lee et de Freitas (1989) ont remarqué que le degré de décoloration ne constituait pas un critère de classification pour les granites coréens, tandis que GSEG (1995) considère que le degré de décoloration est un signe important d'altération de la matrice rocheuse. D'après les études de terrain en Corée, la luminosité de la couleur est un critère plus important que la décoloration pour la détermination du degré d'altération d'une matrice rocheuse.

Même s'il est difficile de définir le degré d'altération d'une roche *in situ*, quelques critères principaux de la classification de la roche peuvent être utilisés :

- Le degré *F* pour la roche saine veut dire un état parfait qui ne comprend aucune trace d'altération.
- Le degré *SW* correspond à une roche comportant des minéraux décolorés – surtout des plagioclases et des biotites – et l'apparition de fissures.
- Dans la matrice rocheuse de degré *MW*, les fissures s'intensifient de plus en plus de même que la décoloration suite à la décomposition de la plupart des plagioclases et des biotites.
- L'importante décomposition de tous les plagioclases et de la plupart des feldspaths potassiques et des biotites est une caractéristique du degré *HW*. Ainsi, de grands morceaux de roche pourront être fragmentés à la main, mais ne seront pas désintégrés dans l'eau.
- Lorsque la roche atteint le degré *CW*, les feldspaths et les biotites s'altèrent en argiles. De même certains morceaux de roche peuvent être désintégrés dans l'eau, mais la structure initiale du massif rocheux est conservée.
- Le sol résiduel *RS* ne garde pas sa structure initiale, mais conserve sa place originelle.

Le tableau 1 montre la classification que nous avons élaborée pendant nos études de terrains, en nous appuyant sur des critères de classification proposés par Lee et de Freitas (1989) et GSEG (1995) mais en les adaptant.

Tableau 1. Critères de la classification d'altération du granite étudié

	Décoloration	Altération chimique	SHL	Son/Rebond	Impact	Fragilité	Microfissures
F	Non	non	> 50	son métallique rebond important	cassure difficile par des coups de marteau	non	rares, très serrées si elles existent
SW	Quelques feldspaths blanchâtres	biotite : non, plagioclase : un peu blanchâtre, feldspath potassique : pas d'altération	50 40	son clair, rebond important	cassure des parties anguleuses par 2-3 coups	non	légèrement développées, contacts entre les épontes
MW	Blanchâtre jaunâtre	biotite : un peu décolorée, plagioclase: jaunâtre signe de décomposition le long des microfissures	40 25	son creux, mauvais rebond	cassure suivant les fissures, cassure facile par 2-3 coups	parfois le long des fissures	développées avec 5 ~ 10mm d'espacement, quelques fissures ouvertes
HW	jaune claire jaune foncé	biotite : brune et quelques particules détachées, plagioclase : jaune foncé feldspath potassique : blanchâtre ~ jaunâtre	25 10	son très lourd sans rebondi	cassure facile par un coup de marteau, découpage au canif	gros morceaux	développées avec 2 – 5 mm d'espacement, plupart des fissures ouvertes
CW	jaune foncé	la plupart des biotites/feldspaths potassiques et tous les plagioclases sont décomposés	< 10	son très lourd, sans rebond	empreinte du marteau, coupé par le canif	oui	discontinuités de la roche non distinguables

SHL : Indice de rebondissement au scléromètre de Schmidt type L
 Son/Rebond : Son et rebondissement d'un coup de marteau de géologie
 Impact : découpage au canif/avec le marteau de géologue
 Fragilité : désagrégation à la main/ au coup de pied

INDICES D'ALTÉRATION

Pour pouvoir estimer quantitativement l'état d'altération d'une roche et caractériser son altérabilité, différents indices d'altération peuvent être utilisés. D'une manière générale, un indice d'altération peut donc s'exprimer par une relation du type :

$$\text{Indice d'altération} = \frac{C_s - C_a}{C_s} \quad \text{ou} \quad \frac{C_a}{C_s}$$

où C_s est une propriété d'une roche saine et C_a est celle de la roche altérée.

L'indice d'altération est en général basé sur des caractères mécaniques ou physiques de la roche et le caractère pétrographique. Différents indices d'altération ont déjà publié. Fookes *et al.* (1988) ont proposé pour les granites d'Angleterre l'indice de durabilité de roche (RDI).

$$RDI_{sq} = \frac{I_{s(50)} - 0,1[10,23(Q_A) - 0,7]}{SG_{ssd}}$$

$I_{s(50)}$: valeur de l'essai Franklin(MPa)

SG_{ssd} : masse volumique de l'échantillon saturé

Q_A : teneur en eau après immersion brutale

Fookes *et al.* (1988) ont signalé que cet indice pourrait être utile pour estimer le taux de dégradation d'une roche en fonction du temps.

D'après notre étude, nous proposons un autre indice d'altération qui se compose des termes de résistance à la compression simple, de teneur en eau (Q_A) et de masse volumique. Cet indice sera traité en détails au chapitre 3 en prenant appui sur des mesures faites sur le granite coréen. Il s'exprime ainsi :

$$I_a = \frac{\text{Résistance}_{\text{altérée}}}{\text{Résistance}_{\text{saine}}} \times \frac{\text{Masse volumique sèche}(g/cm^3)}{Q_A(\%)}$$

La résistance à la compression simple peut être obtenue directement ou à partir d'essais équivalents. Dans tous les cas, la comparaison des résistances entre la roche saine et la roche altérée doit être effectuée par le même type d'essai. Cette équation s'appuie également sur la teneur en eau Q_A .

CARACTÉRISATION DES SITES D'ÉTUDE

Trois sites d'étude dans des massifs rocheux de type granitique ont été choisis dans la zone métamorphique d'Okchon (voir figure 1) : Gimcheon, Jecheon et Geumsan.

Les granites de la région de Gimcheon mis en place dans des gneiss précambriens se répartissent entre granodiorite d'âge inconnu, diorite quartzique et granite à biotite à grain fin à moyen d'âge jurassique. Comme ils sont intrusifs dans le complexe de gneiss suivant des contacts mal définis, on peut trouver à l'intérieur du massif granitique des panneaux de gneiss. Ce massif granitique est composé de :

- orthogneiss et gneiss à biotite dont la foliation est nette, avec alternance de lits de feldspaths et de biotite (échantillons qui commencent par *W*)
- granodiorite à biotite à grain fin à moyen de couleur beige. Les feldspaths sont souvent légèrement rosés et les biotites sont dispersées dans toute la roche (échantillons qui commencent par *T*)
- granite porphyroïde à biotite et un granite à biotite à grain moyen (échantillons qui commencent par *G*).

Le granite de la région de Jecheon est le granite porphyroïde à biotite à gros grains (échantillons qui commencent par *J*), qui s'appelle le granite de *Songhak* intruit dans la formation *Seochangri* et dans la formation *Samtaisan*. Le granite de *Songhak* est une roche porphyroïde, qui contient des minéraux de tailles variables, pouvant dépasser 10 cm. Les principaux minéraux composant ce granite sont le quartz, les feldspaths, la biotite et les amphiboles. Dans cette même formation, la roche se divise en deux catégories en fonction de la texture : le granite à biotite à gros grains et le granite porphyroïde à gros grains. Cette différence n'apparaît pas de façon évidente sur le terrain.

Le granite de la région de Geumsan (échantillons qui commencent par *K*) est un granite jurassique à biotite avec une texture porphyroïde. Les composants principaux sont le quartz, les feldspaths, la biotite et quelques minéraux accessoires. C'est un granite à grain fin à moyen dont la taille varie de moins de 0,5 cm à environ 1 cm. Sa couleur est variable et dépend de la couleur des feldspaths généralement d'un rose très pâle à blanc.

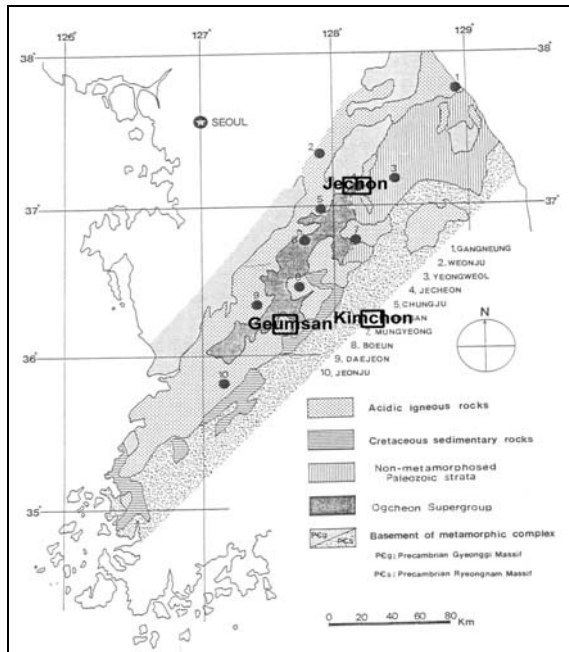


Figure 1. Carte géologique de la Zone d'Okchon

CARACTÉRISTIQUES DES MATRICES ROCHEUSES GRANITIQUES ET GNEISSIQUES

Des investigations géologiques et géotechniques ont été réalisées sur ces trois sites et des campagnes d'échantillonnage de roches granitiques et gneissiques à différents degrés d'altération ont été menées. Nous avons caractérisé la matrice rocheuse en utilisant les techniques suivantes : observation à l'œil nu, détermination des caractéristiques pétrographiques, analyse par diffraction X. Concernant la description pétrographique, des lames minces ont été effectuées pour chaque échantillon (une ou deux lames minces pour chaque type). Les observations microscopiques ont pour l'objectif l'identification des minéraux constitutifs, l'observation des microfissures et des contacts intergranulaires et la caractérisation de la propagation de l'altération. L'analyse par diffraction des rayons X a été menée sur des échantillons sains (*F* ou *SW*) et fortement altérés (*HW*) de chacun des trois types de roche : granodiorite, orthogneiss et granite à biotite. Ceci permet d'étudier l'évolution de la composition minéralogique en fonction du degré d'altération.

Observations à l'œil nu

Les descriptions à l'œil nu de chaque échantillon ont servi à déterminer le degré d'altération de chaque échantillon. L'altération de plagioclases et de biotites est bien marquée dans la mesure où l'état d'altération progresse. La couleur générale de la roches altérées montre une dominante brune à cause de l'oxydation lors de l'altération des biotites abondantes et aussi la couleur avec perte de son éclat initial dû à l'altération des feldspaths et surtout des plagioclases, qui deviennent blanc laiteux, et aux biotites qui sont généralement oxydées. La fissuration des roches altérées est plus intense et l'altération de surface se traduit par une rugosité plus importante que pour les roches saines. Le tableau 2 résume la description des échantillons à l'œil nu.

Observations pétrographiques au microscope polarisant

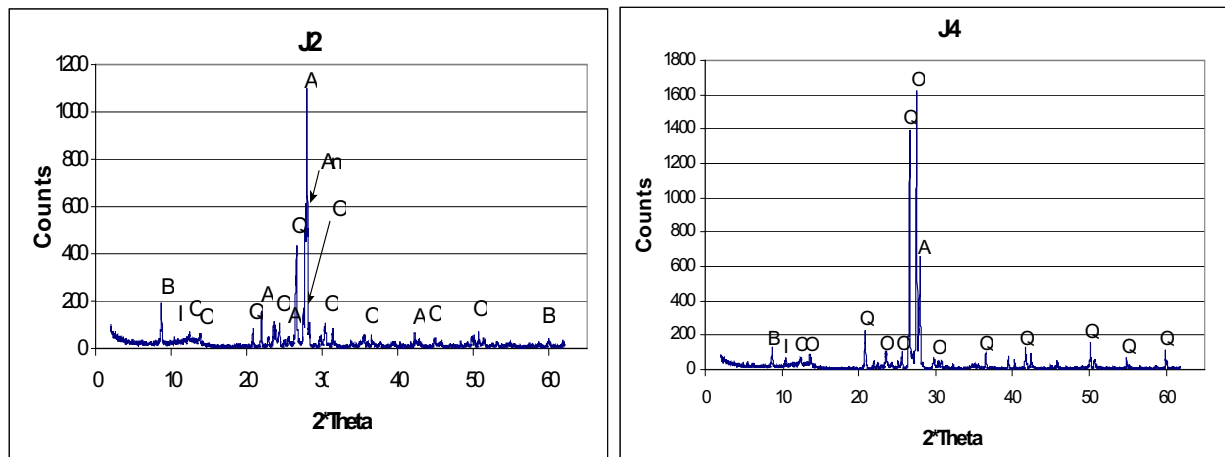
Les clichés de roches granitiques montrent que les principaux minéraux sont le quartz, les plagioclases, les biotites et le microcline. Les minéraux les plus sensibles à l'altération présentent un début d'altération, c'est le cas des plagioclases et des biotites. Les observations microscopiques montrent que les différences entre les roches saines et les roches très altérées se trouvent essentiellement au niveau du degré de fissuration et secondairement au niveau de l'altération chimique. La plupart des clichés de roches altérées présente en effet une microfissuration importante des quartz et des autres minéraux alors que dans le cas des roches saines, elle n'apparaît essentiellement qu'à la faveur des joints intergranulaires. Plus le degré d'altération est fort, plus les microfissures et la recristallisation dans des fissures ouvertes se propagent dans l'ensemble de roche. Des signes d'altération chimique apparaissent déjà sur les lames minces des roches saines : la moitié des plagioclases sont déjà altérés et les biotites laissent apparaître aussi des signes d'altération. Les minéraux plus résistants à l'altération, comme par exemple les feldspaths potassiques, ne présentent peu de signes d'altération. Seul le quartz reste intact sous les observations microscopiques.

Tableau 2. Description des échantillons granitiques de chaque état d'altération à l'œil nu

Etat des feldspaths/biotites	Contacts entre les grains et microfissures	Aspect de surface des échantillons	Remarques générales	Degré d'altération
la plupart des plagioclases commencent à être altérés ; feldspaths potassiques : peu altérés ; biotites : noir foncé vitrifiées, non altérées	contacts serrés, microfissures rarement développées	lisse à granuleuse	pas de signe d'altération sauf une décoloration légère des plagioclases	F
plagioclases deviennent blanchâtres à cause de l'altération ; biotites se décolorent vers le noir brunâtre	présence de fissures qui traversent les grains et entre des grains ; contacts intergranulaires serrés	lisse à granuleuse	présence de fissures plagioclases plus altérés	SW
biotites : traces d'oxydation (noir brunâtre) ou décoloration vers le vert clair ; Ensemble des plagioclases altérés ; la plupart des feldspaths potassiques altérés	contacts entre les grains moins serrés	granuleuse	la couleur de la roche devient plus blanchâtre	MW
biotite : décoloration vers le vert noirâtre ou quelquefois disparition suite à l'oxydation ; feldspaths deviennent blanc laiteux	augmentation des fissures ouvertes ; contacts lâches entre les grains ; oxydation des minéraux sur la surface dans la zone fissurée, grains détachables au canif ou à la main	irrégulière et granuleuse	observations de vacuoles à cause de la disparition des biotites, la couleur de la roche devient plus sombre	MW ~HW

Analyse par diffraction des rayons X

Les échantillons de roche ont été broyés en poudre pour l'analyse par diffraction des rayons X dans chaque famille d'échantillon de la roche. Une évaluation de la teneur d'un élément peut être obtenue approximativement en comparant la hauteur des pics les plus importants présents dans un spectrogramme de DRX. Le minéral ayant la plus forte teneur est le quartz dans les deux échantillons, puis les diverses familles de feldspaths et enfin la biotite. Comme dans la figure suivante qui est le cas du granite porphyrique de la région de Jecheon, nous pouvons remarquer que les proportions relatives en quartz et en orthose, minéraux plus résistants à l'altération, sont plus importantes dans l'échantillon très altéré (J4) que dans l'échantillon sain (J1). Par contre, la proportion relative en biotites et surtout en plagioclases est beaucoup plus faible, car ces minéraux sont très sensibles à l'altération.



Q : quartz, A : albite, B : biotite, An : anorthite, O : orthose

Figure 2. Spectre de DRX du granite SW (J2) et fortement altéré (J4)

Caractéristiques physiques et mécaniques

Pour chaque échantillon, deux ou trois éprouvettes de diamètre 32 ou 50 mm et d'éclatement 2 ont été taillées et soumises à des essais pétrophysiques et mécaniques. Les grandeurs suivantes ont été déterminées :

- poids volumique ;
- teneur en eau après immersion brutale de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures ;
- vitesse de propagation des ondes longitudinales (V_p) et transversales (V_s) sur éprouvette sèche ;
- résistance à la compression simple ;
- module de Young et coefficient de Poisson.

Granodiorite de Gimcheon

Globalement les résultats montrent une diminution importante des caractéristiques physiques et mécaniques entre les échantillons sains (W1) et altérés (W4). La RCS moyenne passe en effet d'une valeur de 270 à 55 MPa. De même les vitesses de propagation des ondes V_p passent de 4500 à environ 2000 m.s⁻¹ et les V_s passent 3000 à 1000 m.s⁻¹.

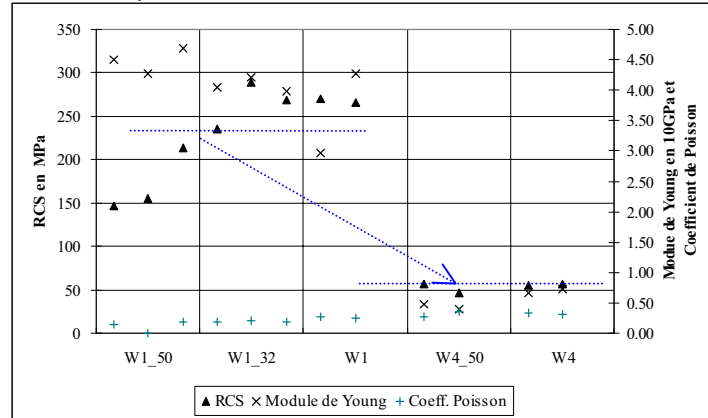


Figure 3. Caractéristiques mécaniques des échantillons (W1 et W4) du tunnel Wolgok

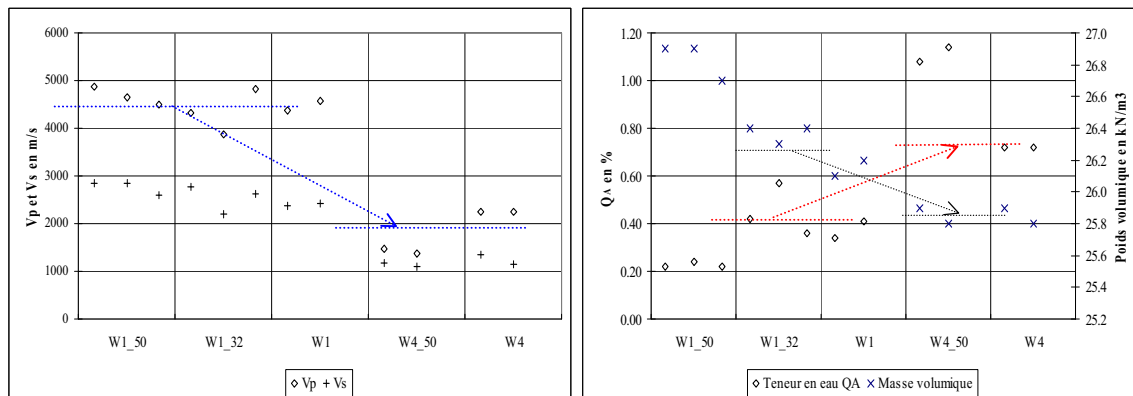


Figure 4. Caractéristiques physiques des échantillons (W1 et W2) du tunnel Wolgok

Pour les échantillons de roche saine (degré *F*), la RCS est de l'ordre de 270 MPa pour les éprouvettes de 32 mm de diamètre, et tombe à environ 150 MPa pour les éprouvettes de 50 mm de diamètre. Cette différence très importante pour être due uniquement à un effet d'échelle (la roche étant à grain fin), pourrait s'expliquer par la présence plus importante de microfissures fermées dans les échantillons de plus grand diamètre, mais cela ne se traduit pas clairement sur les autres paramètres. Pour les échantillons de roche altérée (degré *HW*), la RCS est de l'ordre de 50 MPa sans différence notable entre éprouvette de diamètres différents. Les modules élastiques dépendent bien de l'altération : le module de Young et le coefficient de Poisson des échantillons de degré d'altération *F* sont respectivement plus élevé et moins élevé que ceux des échantillons de degré *HW*. Comme le montre la figure 4, les valeurs de teneur en eau montrent également une augmentation générale et celles du poids volumique présentent une diminution entre les échantillons sains (*F*) et les échantillons les plus altérés (*HW*).

Orthogneiss de Gimcheon

Les résultats expérimentaux sont rassemblés dans les figures 5 et 6. L'ensemble de ces résultats est cohérent puisque les éprouvettes T1 et T2 qui ont les poids volumiques les plus élevés et les Q_A les plus faibles ont également les vitesses de propagation des ondes et les RCS les plus fortes. Les différences entre les deux éprouvettes sont cependant peu importantes, ce qui peut effectivement correspondre à la différence entre les niveaux d'altération *F* et *SW*. Les éprouvettes T3 et T4 correspondent bien à des niveaux d'altération largement plus importants. Il apparaît cependant que les caractéristiques de l'éprouvette T4 soient meilleures que celles de l'éprouvette T3. Il se peut dans le cas présent que l'état d'altération estimé à partir de l'observation macroscopique de la surface de l'échantillon ne corresponde pas à celui de l'intérieur de la carotte. Au vu de ces résultats, nous pouvons penser que l'échantillon T3

doit être classé dans la catégorie intermédiaire entre roche fortement altérée et moyennement altérée (MW~HW), et que l'échantillon T4 soit plutôt dans la catégorie des roches moyennement altérées (MW).

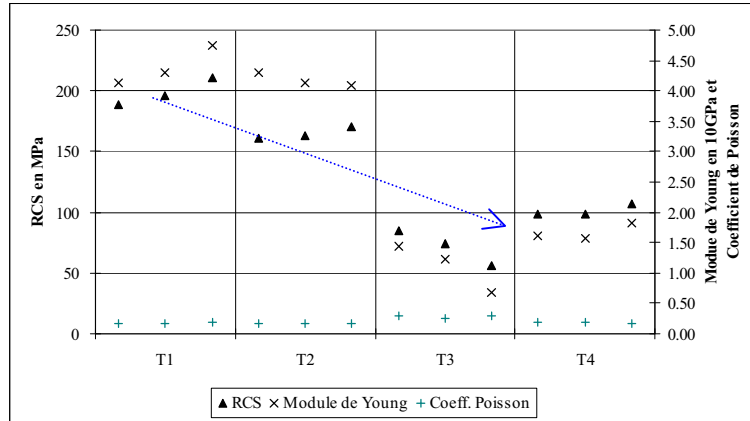


Figure 5. Caractéristiques mécaniques des échantillons du tunnel *Sangchon*

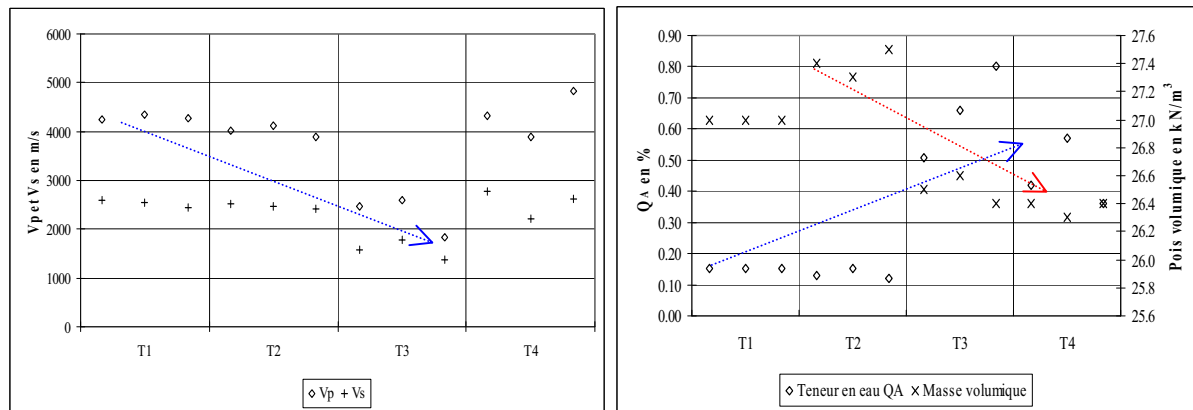


Figure 6. Caractéristiques physiques des échantillons du tunnel *SangChon*

Granite de Gimcheon

La RCS de l'éprouvette G1 est de l'ordre de 180 MPa et sa vitesse V_p est environ 5000 m.s^{-1} . Les échantillons G2 et G3 ont été initialement classés dans les catégories *SW* et *MW* sur la base des observations macroscopiques et minéralogiques. Les résultats montrent cependant que leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont peu différentes, et il serait plus logique de leur attribuer le même degré d'altération. Si nous comparons avec les valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques des autres granites étudiés, les valeurs obtenues pour G2 et G3 sont intermédiaires entre celles d'une roche légèrement altérée (*SW*) et moyennement altérée (*MW*).

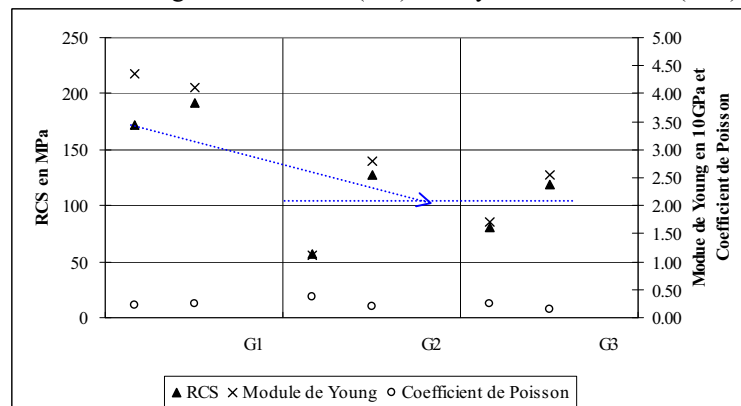
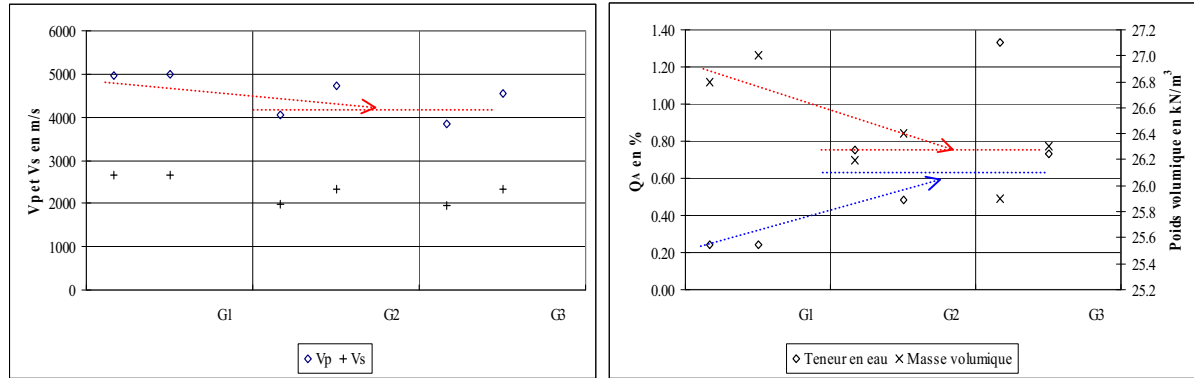


Figure 7. Caractéristiques mécaniques des échantillons du tunnel *Gitan*

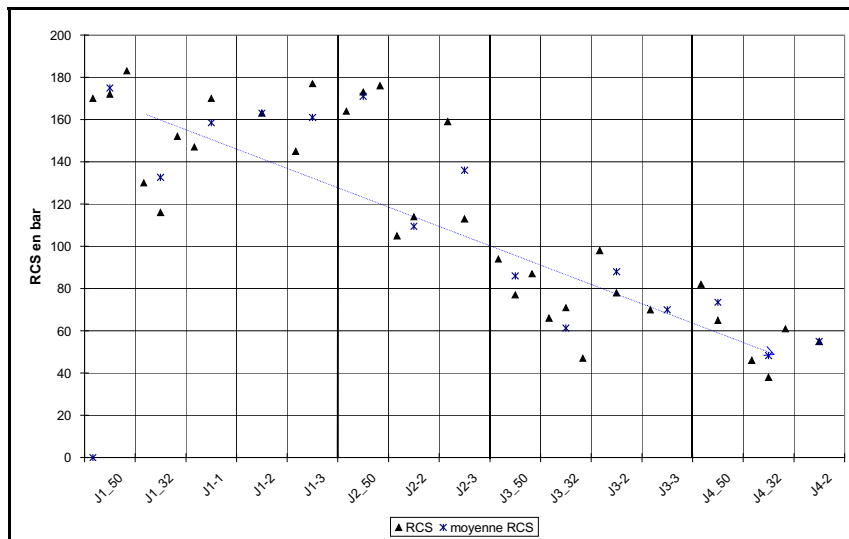
Figure 8. Caractéristiques physiques des échantillons du tunnel *Gitan*

Granite de Jecheon

Il s'agit du granite à biotite porphyroïde à gros grain avec de gros cristaux de feldspath rougeâtre. Les figures 9, 10 et 11 montrent des caractéristiques mécaniques et physiques mesurées en regroupant les éprouvettes en fonction de leur degré d'altération.

Lors de la comparaison entre les éprouvettes de même dimension mais taillées dans les échantillons d'altération différente, une différence peut être notée pour la RCS, les vitesses de propagation des ondes V_p et V_s et la Q_A . La RCS des éprouvettes de degré *F* de 32 mm de diamètre est d'environ 160 MPa, tandis que la RCS des éprouvettes de degré *SW* est d'environ 110 MPa. En ce qui concerne les éprouvettes de degrés *F* et *SW* de 50 mm de diamètre, la différence entre leurs RCS est très faible. En revanche, une différence notable existe pour le module de Young et la teneur en eau Q_A . De plus, la RCS de tous les échantillons de degré *MW* varie entre 60 et 90 MPa, et la RCS des échantillons de degré *HW* fluctue entre 40 et 60 MPa. Contrairement à la différence très nette entre les échantillons de degrés *SW* et *MW*, les caractéristiques des échantillons de degré *MW* sont légèrement plus élevées que celles de degré *HW*, en raison du fait que l'échantillonnage pour des roches de degré *HW* a été réalisé sur des roches de degré d'altération intermédiaire entre *MW* et *HW*.

Les vitesses des ondes V_p et V_s diminuent globalement quand le degré d'altération augmente même si les différences ne sont pas toujours bien marquées entre les échantillons de degrés *F* et *SW* et entre les échantillons de degrés *MW* et *HW* : la vitesse V_p des échantillons de degrés *F* et *SW* varie entre 4000 et 5000 m.s^{-1} (à l'exception des échantillons J1_50 et J1_32), et la vitesse V_p des échantillons de degrés *MW* et *HW* oscille entre 2000 et 2700 m.s^{-1} , avec quelques exceptions (J4_32 et J4-2m). La Q_A est assez sensible au changement du degré d'altération : celle des échantillons de degré *F* est autour de 0,2 %, celle de degré *SW* est de 0,3 % et celle de degrés *MW* et *HW* est autour de 0,6 %. Enfin, la faible différence entre les Q_A des échantillons de degrés *MW* et *HW* peut résulter de la même raison que pour le cas de RCS.

Figure 9. Résistance à la compression simple du granite du site *Jecheon* en fonction du degré d'altération et de la taille d'échantillons

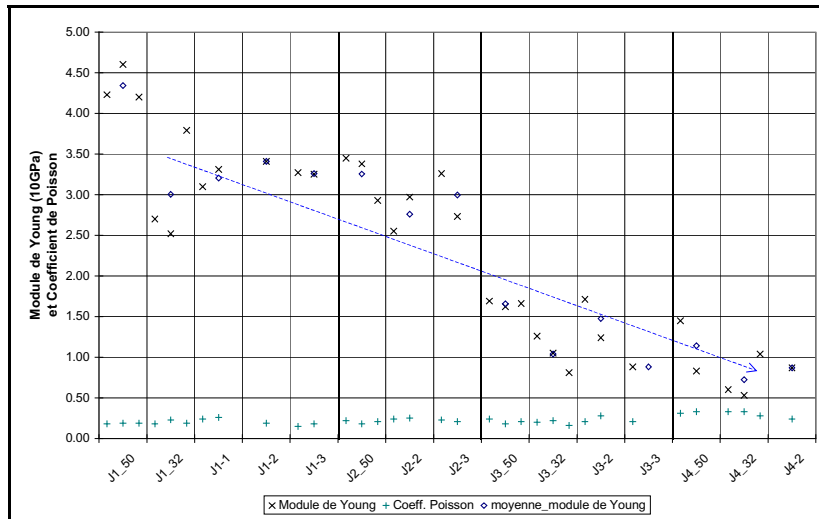


Figure 10. Module de Young et coefficient de Poisson en fonction du degré d'altération et de la taille d'échantillons

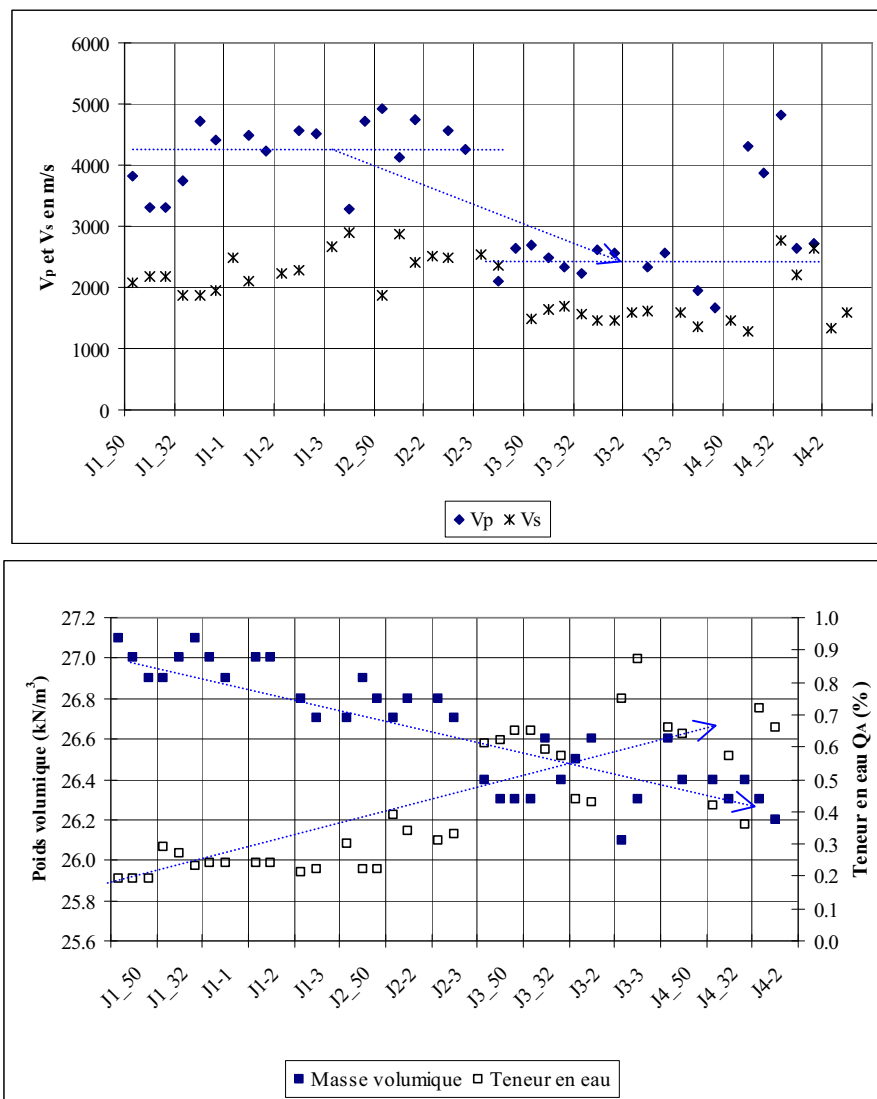


Figure 11. Caractéristiques physiques du granite du site Jechon

Granite du site Geumsan

Il s'agit des échantillons de granite à grain moyen de 32 mm de diamètre du site *Geumsan*. Les figures 12 et 13 montrent les caractéristiques mécaniques et physiques des échantillons K1, K2, K3 et K4. D'une manière générale, les résultats des essais au laboratoire ne montrent pratiquement pas de différence entre les échantillons K2 et K3, bien

qu'ils soient issus de roches qui semblent, du moins en surface, significativement différentes l'une de l'autre : le bloc de roche K2 est faiblement altéré et celui de K3 est moyennement altéré. Il est par contre possible que ces différences soient moins marquées à l'intérieur du bloc à cause de l'hétérogénéité générale des roches et d'un niveau de pénétration différent de l'altération vers l'intérieur de la roche. Les éprouvettes en provenance de l'échantillon K3 peuvent donc être classées avec le même degré *SW* que les éprouvettes issues de l'échantillon K2. La résistance à la compression simple a globalement tendance à diminuer quand le degré d'altération augmente. A titre indicatif, les échantillons de degré *F* ont une RCS de l'ordre de 200 MPa, ceux de degré *SW* à peu près 150 MPa et ceux de degré *HW* à environ 50 MPa. La valeur de Q_A est considérée comme un facteur important pour caractériser l'aptitude à l'altération des roches (Kim et Hong 1990 ; Hamrol 1961 ; Irfan et al. 1978). Dans le cas des échantillons du site de *Geumsan*, elle varie en effet de manière significative de 0,39 pour les échantillons de degré *F* jusqu'à près de 1,0 pour ceux de degré *HW*. La vitesse des ondes V_p des éprouvettes saines de degré *F* fluctue autour de 5200 m.s⁻¹, celle des éprouvettes de degré *SW* varie entre 4700 et 4800 m.s⁻¹ et celle des éprouvettes de degré *HW* est autour de 3200 m.s⁻¹. Cette diminution est bien marquée entre K4 et les autres échantillons.

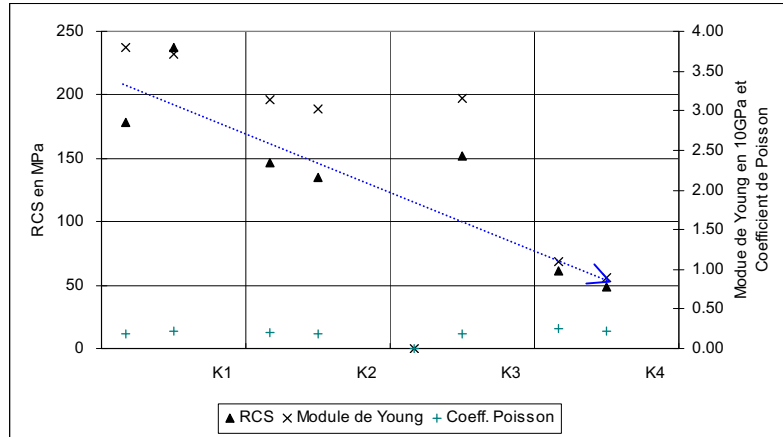


Figure 12. Caractéristiques mécaniques des échantillons (K1, K2, K3, K4) du site *Geumsan*

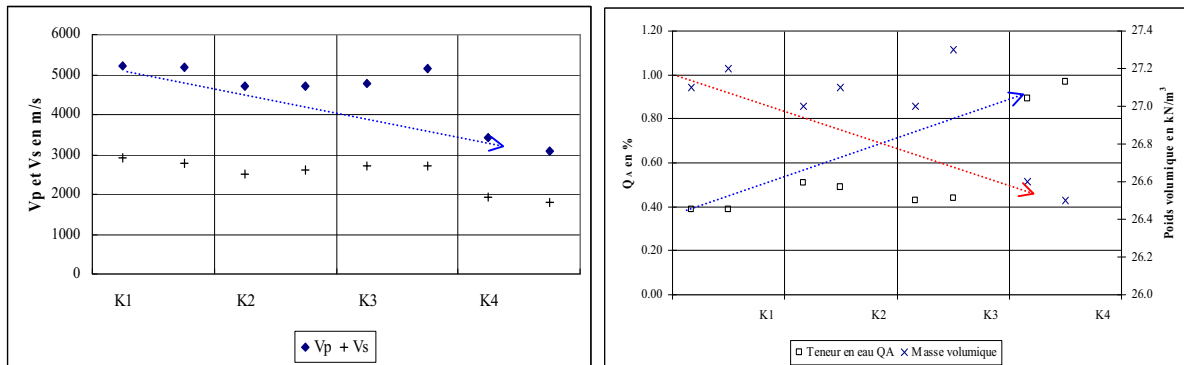


Figure 13. Caractéristiques physiques des échantillons (K1, K2, K3, K4) du site *Geumsan*

INDICES D'ALTÉRATION

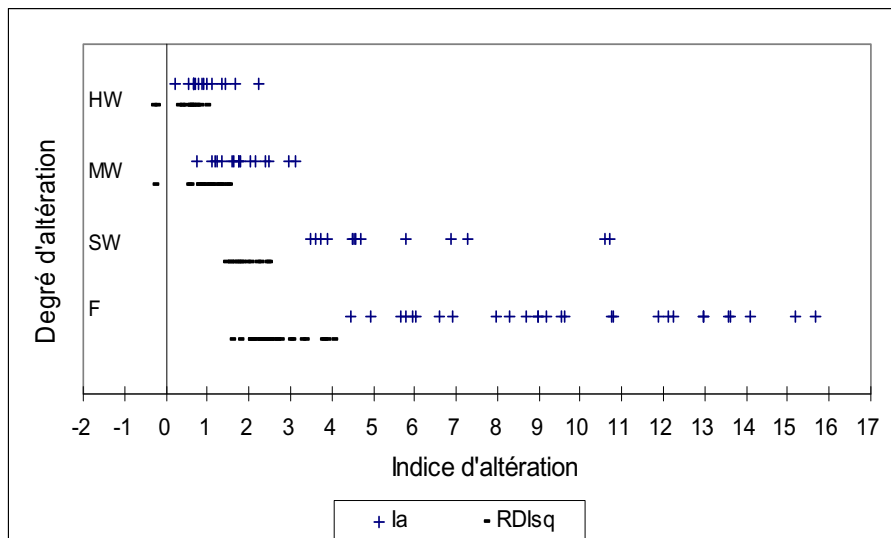
Dans cette section, nous étudions les deux indices d'altération : l'indice d'altération I_a et l'indice de durabilité de la roche en état statique RDI_{sq} . Le tableau 3 montre les valeurs issues des essais mécaniques et physiques effectués sur les différents échantillons, rangées en fonction de leur degré d'altération variant de *F* à *HW*. La plupart des valeurs indiquées – en particulier celles de la RCS des granites – sont proches de celles déjà indiquées par d'autres auteurs (Lee *et al.* 1989 ; Irfan *et al.* 1978, 1985). Les valeurs de Q_A obtenues sont moins élevées que celles citées par d'autres auteurs. A titre indicatif, ces auteurs ont avancé une valeur de Q_A pouvant aller de 0,2 à 1 % sur un granite légèrement altéré (*SW*), de 2 à 10 % pour un granite fortement altéré (*HW*) et de plus de 10 % pour un granite complètement altéré (*CW*). Les valeurs de Q_A obtenues ici représentent en général la moitié de ces valeurs. Les variations de la vitesse des ondes peuvent être importantes et par conséquent, les vitesses V_p et V_s ne peuvent pas être utilisées pour déterminer le degré d'altération.

Il est à noter enfin que même si nous avons réussi à proposer un intervalle de variation pour chaque caractéristique mécanique et physique en fonction du degré d'altération, la transition entre deux degrés d'altération est en toute rigueur encore difficile à déterminer, et dépend certainement du type de roche. L'observation macroscopique des échantillons peut apporter une aide pour trancher entre deux degrés d'altération.

Tableau 3. Intervalle de variation des valeurs des caractéristiques des roches étudiées

	RCS (MPa)	V_{p-1} (m.s ⁻¹)	V_{s-1} (m.s ⁻¹)	Q_A (%)
F	150 ~ 300	4000 ~ 5200	2200 ~ 3000	0,12 ~ 0,41
SW	100 ~ 170	3200 ~ 4500	1800 ~ 2500	0,22 ~ 0,49
MW	60 ~ 110	2000 ~ 3900	1400 ~ 2000	0,36 ~ 1,0
HW	30 ~ 65	1200 ~ 2700	1100 ~ 1700	> 1,0

Une seule caractéristique physique ou mécanique d'une roche ne suffit pas pour déterminer son degré d'altération. Ainsi, un indice d'altération se base sur la combinaison de plusieurs caractéristiques pour refléter le degré d'altération d'une roche. En particulier, les indices d'altération I_a et RDI_{sq} utilisent le poids volumique, la teneur en eau et la résistance à la compression simple. La figure 14 montre les valeurs de ces deux indices calculées à partir des résultats des essais en fonction du degré d'altération des échantillons concernés. La définition des deux indices I_a et RDI_{sq} s'appuie beaucoup sur la valeur de Q_A , car ce paramètre est censé être le plus important pour contrôler l'altérabilité d'une roche.

Figure 14. Indices d'altération I_a et RDI_{sq} en fonction du degré d'altération

Si nous excluons les valeurs extrêmes et tenons compte du chevauchement entre les différents degrés de la figure 14, les valeurs des deux indices peuvent être classées en fonction de l'état d'altération de la roche dans le tableau 4. Nous pouvons noter ici que le champ des valeurs de I_a est plus étendu que celui de RDI_{sq} , ce qui facilite la discrimination.

Tableau 4. Classification de l'indice d'altération I_a et RDI_{sq}

Degré d'altération	I_a	Durabilité potentielle	RDI_{sq}
F	> 7	Excellent	> 2,5
SW	3,5 ~ 10	Good	2,5 ~ -1
MW	1,0 ~ 6,0	Fair	1 ~ -3
HW	< 2,5	Poor	< -3

CONCLUSIONS

Les roches granitiques et gneissiques étudiées ont été classées en six degrés d'altération sur la base d'observations macroscopiques de terrain et d'essais physiques et mécaniques de laboratoire. Les études minéralogiques ont été réalisées en se basant sur des observations microscopiques de lames minces et sur l'analyse par diffraction des rayons X. L'altération des minéraux touche tout d'abord les feldspaths, surtout les plagioclases, puis la biotite et les feldspaths alcalins. Le quartz ne montre pas de traces d'altération chimique. En revanche, le niveau de fissuration augmente avec l'altération. Les signes d'altération apparaissent déjà dans les clichés de roches saines : altération des plagioclases et des biotites, et début de fissuration du quartz et du microcline. D'autre part, l'ordre d'altération des minéraux est vérifié par les rayons X. D'une manière générale, la proportion des minéraux plus sensibles à l'altération diminue alors que la proportion des minéraux plus résistants à l'altération reste presque constante au fur et à mesure que le degré d'altération augmente.

Les caractéristiques mécaniques et physiques de la matrice rocheuse ont été déterminées en fonction du degré d'altération. Globalement, les caractéristiques se dégradent quand le degré d'altération augmente, en particulier la résistance et le module de Young diminuent et la teneur en eau après immersion brutale (Q_A) augmente. Par contre, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores longitudinales (V_p) et transversales (V_s) est moins sensible au changement de degré d'altération. Le coefficient de Poisson augmente généralement avec l'augmentation de l'altération, mais sa variation est limitée.

À partir des caractéristiques physiques et mécaniques, une classification de chacun de ces paramètres a pu être établie en fonction du degré d'altération. Les indices d'altération, I_a et RDI_{sq} , ont été évalués et une classification des degrés d'altération a été proposée.

Acknowledgements: This study was performed in the context of the project between Korean- France KOSEF(Korean Science and Engineering Foundation)-ARIEL(Association for Research with Industrial and Educational Links) with the collaboration of KIGAM in Korea and by the financial support of the French embassy in Korea and of KOSEF. The National Research Lab. Project(Grant#M1-032-00-0063) of Korea Ministry of Science and Technology support the writing of this paper. These supports are gratefully acknowledged.

Corresponding author: Mr Ik Woo, Geohazard information Lab. Sejong University, 98 Gunja-dong Gwangjin-gu, Seoul, 143-747, South Korea. Tel: +82 1 3408 3347. Email: ikwoo_2000@yahoo.com.

REFERENCES

- DEARMAN W. R. 1976. Weathering classification in the characterisation of rock. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13, 123 - 127.
- DEARMAN W. R., BAYNES F. J. & IRFAN T. Y. 1978. Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, 12, 345-374.
- FOOKES P. G., DEARMAN W. R. & FRANKLIN J. A. 1971. Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 4, 139-185.
- FOOKES P. G., GOURLEY C. S. & OHIKERE C. 1988. Rock weathering in engineering time, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21(1), 33-58.
- G.S.E.G. 1970. Geological Society Engineering Group Working Party Report : The logging of rock cores for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 3, 1-24.
- G.S.E.G. 1977. Geological Society Engineering Group Working Party Report : The description of rock masses for engineering purpose. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 10, 1355-388.
- G.S.E.G. 1981. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24, 253-274.
- G.S.E.G. 1990. Geological Society Engineering Group Working Party Report : Tropical residual soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 23, 1-101.
- G.S.E.G. 1995. Geological Society Engineering Group Working Party Report : The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28(3), 207-242.
- HAMROL A. 1961. A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. *Proceedings of 5th International Conference of Soil Mechanics And Foundation Engineering*, Paris 2, 771-774.
- IAEG(International Association of Engineering Geology). 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and soil materials. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 19, 364-371.
- IRFAN T. Y. & DEARMAN W. R. 1978. Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 17, 79-90.
- ISRM(International Society of Rock Mechanics). 1981 Basic geotechnical description of rock masses : *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 22, 51-60.
- Kim Y. H. & Hong S. H. 1990. A quantitative study on the variational features of rock properties followed by weathered in granites. *Journal of Korean Institute of Mining and Geology*, 23(2), 221-23(in Korean)
- LEE S. G. & DE FREITAS M. H. 1989. A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 22, 31-4.
- MOYE D. G. 1955. Engineering geology for the Snowy Mountains scheme. *Journal of the Institution of Engineers Australia*, 27, 281-299.
- RUXTON B. P. & BERRY L. 1957. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. *Bulletin of the Geological Society of America*, 68, 1263-1292.
- WOO I. 2003. Alterability of granites and gneisses in South Korea. Consequences on the long-term stability of excavated rock slopes. *PhD theses in Paris School of Mines*, 205p. (in French)