

Origine de la fracturation des aquifères de socle : quels sont les facteurs qui contrôlent les propriétés de l'horizon fissuré ?

Origin of fracturation in hard-rock aquifers: what are the factors that control the properties of the fissured horizon?

Robert Wyns⁽¹⁾, Benoît Dewandel⁽²⁾ et Patrick Lachassagne⁽³⁾

(1) BRGM, ISTO, UMR 7327, Orléans ; (2) BRGM, D3E, Montpellier ; (3) Danone Waters, Evian-Volvic-World, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex
r.wyns@brgm.fr

I. INTRODUCTION

La découverte de l'horizon fissuré dans la partie profonde des profils d'altération a été faite à la fin des années 1990 dans le cadre d'un projet de recherche du BRGM sur les propriétés physiques des roches en contexte de socle altéré. Dès le début des années 2000, l'intérêt de cette découverte en hydrogéologie a suscité de nombreux travaux de validation menés dans différentes régions du Monde (France, Inde, Corée du sud, Afrique, Guyane, Nouvelle Calédonie...) (Dewandel et al., 2006 ; Lachassagne et al., 2011 et 2014). Parallèlement, l'étude des conditions permettant le développement des profils latéritiques a permis de démontrer que ceux-ci étaient représentés sous toutes les latitudes, le climat ne jouant qu'un rôle mineur. Nous présenterons ici l'organisation des types d'altération à l'échelle d'un continent, puis les mécanismes à l'origine de la fissuration, et enfin les critères lithologiques (minéralogie, structure et texture des roches) favorisant le développement d'un horizon fissuré.

II. CLASSIFICATION DES ALTERATIONS SUPERGENES

Les différents types d'altération supergène, résultant de l'interaction eau-roche, forment une série continue allant d'un pôle soustractif (perte nette de matière par rapport à l'état initial) à un pôle additif (gain net de matière) (Figure 1).

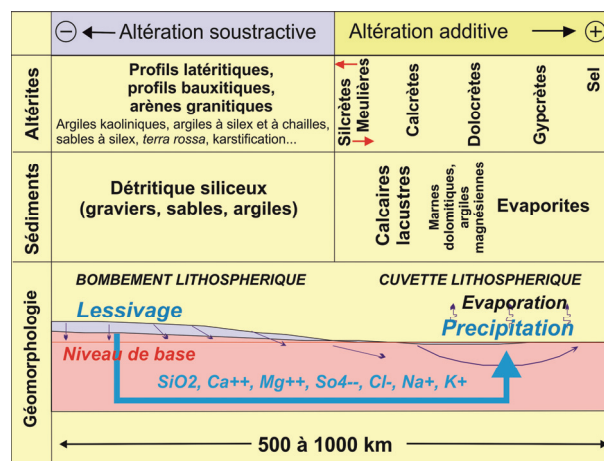


Figure 1 - Classification des altérations supergènes (modifié de Wyns 2002, Wyns et al., 2003 et 2014), et migration des cations et anions à l'échelle continentale

II. 1 L'altération soustractive

Les profils d'altération soustractive comprennent les profils latéritiques (sur roches plutoniques, métamorphiques ou volcaniques), les profils bauxitiques (sur les mêmes familles de roches mais pauvres en quartz, ainsi que sur les roches marneuses ou argileuses), et les profils sur roches sédimentaires (argiles à silex ou à chailles, sables à silex, manteaux d'argile kaolinique). Le mécanisme principal de l'altération soustractive est l'hydrolyse des minéraux primaires sous l'action de l'eau, mise en solution des cations et anions les plus solubles et leur évacuation vers l'aval, et précipitation de minéraux néoformés (principalement argiles, hydroxydes et oxydes) à partir des éléments chimiques restés sur place. Pour que l'hydrolyse des minéraux primaires soit possible, la composition chimique de l'eau doit être en permanence sous-saturée par rapport aux minéraux de la roche, ce qui implique que l'eau puisse s'écouler : on doit être à l'amont d'un gradient hydraulique régional. Les altérations soustractives se développent donc sur des régions émergées et soulevées des lithosphères continentales (épaulements de rifts, flambage lithosphérique, passage d'une plaque sur un point chaud...), après une phase d'aplanissement permettant à l'eau de s'infiltrer lentement (une pente moyenne forte favorise le ruissellement et l'érosion mécanique). La durée de fonctionnement d'un profil d'altération est de plusieurs dizaines de millions d'années, et de nombreux profils sont polyphasés. Des études en cours montrent que des profils latéritiques avec horizon fissuré très épais existent dans beaucoup de chaînes de montagne (surfaces perchées pyrénéennes par exemple).

II. 2 L'altération additive

Le principal mécanisme de l'altération additive est la précipitation de minéraux néoformés dans la zone non saturée à partir des éléments dissous dans l'eau souterraine, le moteur permettant d'atteindre la limite de saturation des différents minéraux étant l'évapotranspiration et le dégazage du CO₂ (Wyns et al., 2014). Ce fonctionnement implique que la surface de la nappe soit à faible profondeur (quelques mètres) sous la surface du sol : ce type d'altération se développe donc dans les points bas du paysage (grandes dépressions intracontinentales, fossés d'effondrement, côtes basses). Par ailleurs l'évapotranspiration doit être supérieure aux précipitations. Les minéraux néoformés forment des cuirassements des quelques décimètres à quelques mètres d'épaisseur sous la surface du sol. Lorsqu'on se déplace de l'amont vers l'aval à l'échelle d'un continent, les premiers minéraux à précipiter sont les moins solubles (silice formant des silcrètes et des meulière), puis on précipite de la calcite (calcrètes), de la dolomite (dolocrètes), du gypse (gypcrètes) et enfin des chlorures. L'altération additive est nourrie par la matière issue des zones en altération soustractive.

III. L'HORIZON FISSURE DES PROFILS LATÉRIQUES

III. 1 Structure d'un profil latéritique

On réserve généralement le terme de profil latéritique aux profils d'altération soustractive développés sur roches cristallines (plutoniques, métamorphiques ou volcaniques). Seuls ces profils d'altération sont susceptibles de contenir un horizon fissuré dans leur partie profonde.

Un profil latéritique comprend généralement, de haut en bas (*Figure 2*) :

- Une *cuirasse* ferrallitique, épaisse de 1 à 10 m, résultant de la recristallisation en sommet de profil des grains de goethite (hydroxyde de fer) issus de l'altération en zone saturée des minéraux ferromagnésiens primaires en hématite massive (oxyde de fer) sous l'effet d'une saison sèche. La cuirasse peut disparaître du sommet des profils latéritiques soit par érosion, soit le plus souvent par réhydratation lorsque le profil s'engorge par suite d'une subsidence lithosphérique : c'est généralement le cas pour les profils anciens.
- Des altérites meubles (*saprolite*) formées d'un mélange d'argiles, d'hydroxydes ou d'oxydes et de minéraux résiduels (quartz). On distingue généralement dans la partie inférieure des *isaltérites* où

la structure de la roche initiale est préservée (la matière évacuée est remplacée par de la porosité), et dans la partie supérieure des *allotérites*, où la structure de la roche initiale a disparu. Au sommet de la saprolite, les argiles tachetées, d'épaisseur métrique, constituent un horizon de transition avec la cuirasse. Dans les roches grenues (granitoïdes, gabbros), la partie inférieure de la saprolite prend un aspect feuilleté (*horizon feuilleté*), le feuilletage ou lamination résultant du resserrement des joints de l'horizon fissuré jusqu'à un espacement millimétrique.

- Un *horizon fissuré*, caractérisé par une forte densité de fractures dans une roche dure : la densité et la connectivité des fractures sont maximales au sommet et décroissent vers le bas. La roche primaire reste dure et peu altérée, sauf le long des fractures et des capillaires associés. Dans les roches grenues isotropes les fractures ont une géométrie plane caractéristique.
- La roche « saine » où seules existent d'éventuelles fractures résultant de l'histoire tectonique.

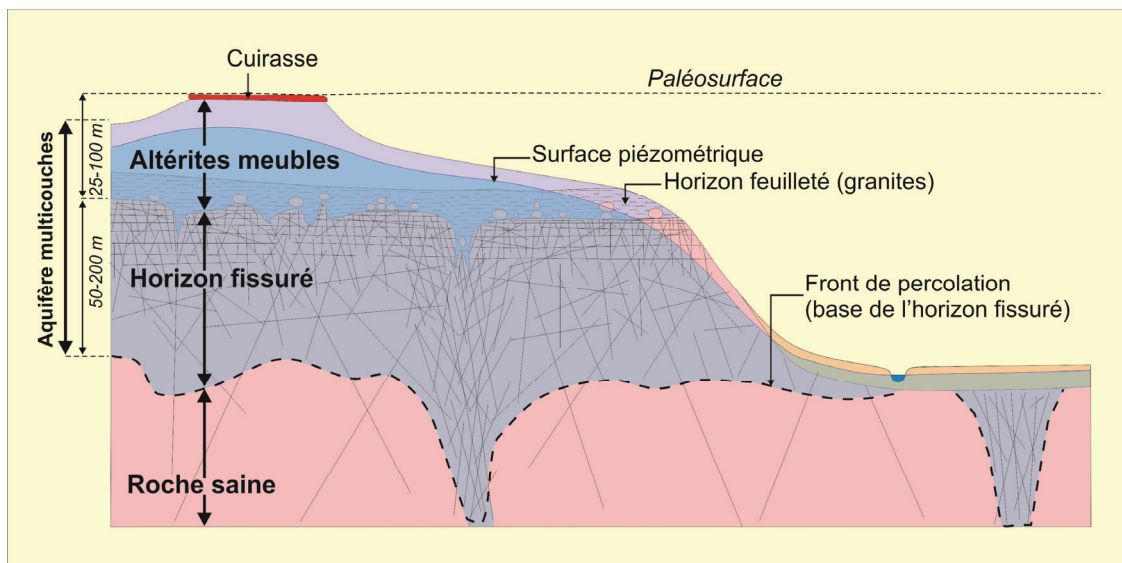


Figure 2 - Structure d'un profil latéritique recoupé par la topographie actuelle (modifié de Wyns, 1998 et Wyns et al., 2004)

L'épaisseur des altérites meubles (saprolite) est généralement de plusieurs dizaines de mètres et peut dépasser 100 m. L'horizon fissuré a généralement une épaisseur double de celle de la saprolite.

III. 2 Mécanisme de la fissuration

L'existence d'une zone fissurée au sommet du bed-rock sous les argiles d'altération des profils latéritiques était connue depuis longtemps, mais était interprétée tantôt comme résultant de la décompression par érosion (off-loading), tantôt comme résultant de la contraction thermique pour les roches plutoniques (Lachassagne et al., 2011). La création de fentes de tension par décompression nécessite que la diminution de l'une des composantes du tenseur de contraintes soit rapide, ce qui est le cas par exemple lors du creusement d'une galerie de mine. Dans la nature, la diminution de la contrainte verticale due à l'érosion est trop lente pour créer des fentes de tension, car les contraintes ont le temps de se réorganiser au niveau des joints de grains. La présence d'un horizon fissuré dans le granite à deux micas de Mortagne à Mallièvre (Figure 3) et son absence dans le microgranite de Thouars distant de 50 km alors que les deux massifs, recoupés par la même paléosurface pré-cénomaniennne, ont subi la même histoire érosive, montre que la décompression n'est pas à l'origine de l'horizon fissuré.

Par ailleurs, les joints horizontaux des granites ne peuvent être dus à la contraction thermique lors du refroidissement de la chambre magmatique, car ces joints horizontaux affectent aussi les orthogneiss et les migmatites à foliation verticale.



Figure 3 - A gauche : l'horizon fissuré dans le granite à deux micas de Mallièvre ; à droite : absence d'horizon fissuré dans le microgranite de Thouars, distant de 50 km du précédent. Les deux massifs ont subi la même histoire érosive, l'absence de fissures dans le microgranite montre que la décompression par érosion n'est pas à l'origine des fissures horizontales du granite

La compréhension du mécanisme de la fissuration des granites résulte de l'étude pétrographique de deux forages carottés dans des profils latéritiques sur granite. En profondeur, à plus de 50 m sous la base des arènes, les biotites sont généralement saines. Puis, au fur et à mesure que l'on monte vers le haut, une partie des biotites commence à se transformer soit en chlorite, soit en vermiculite, et l'on observe alors une déformation des clivages autour des zones en voie d'altération, qui traduisent un gonflement des feuilletés (Figure 4a). Dans l'horizon feuilleté, à la base des arènes, toutes les biotites ont été altérées (Figure 4b) et on observe un intense réseau de microfissures.

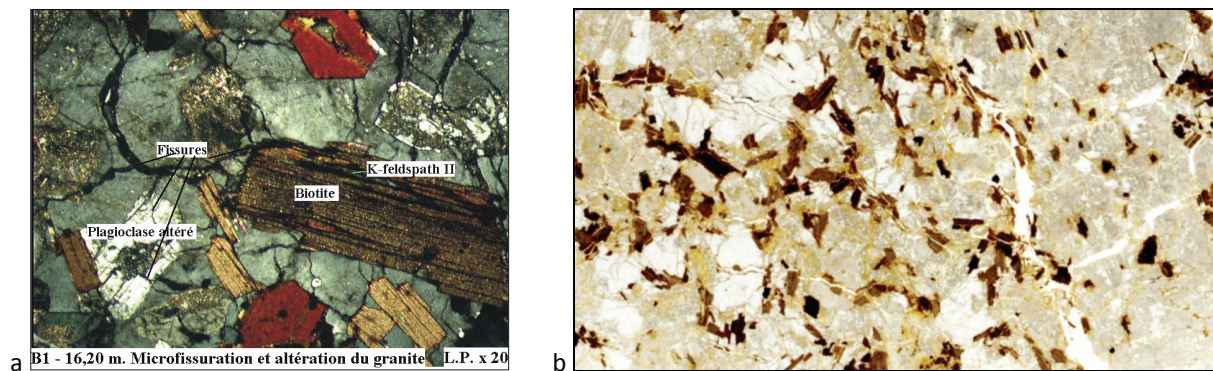


Figure 4 - a : Cristal de biotite en voie d'altération dans l'horizon fissuré (Granite de Langonnet, Morbihan, France). Noter la déformation des clivages de la biotite autour des zones altérées et l'apparition de microfissures ; b : Base des arènes (horizon feuilleté) : toutes les biotites ont été altérées (taches brunes soulignées par la goethite). Noter l'intense réseau de microfissures.

Ainsi, l'altération d'une biotite, en se transformant en chlorite ou en vermiculite, provoque une augmentation potentielle du volume du cristal d'environ 40 %. Cette transformation se fait au sein de l'horizon fissuré, à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Dans ces conditions, le gonflement est impossible (sauf à proximité des fissures préexistantes) car le milieu est rigide, et peut être considéré comme infini dans le plan horizontal : il en résulte une augmentation des contraintes horizontales. Dans le plan vertical, le gonflement ne sera possible que lorsque la contrainte verticale sera supérieure ou égale à la charge lithostatique.

Dans un granite, dès que la charge lithostatique est compensée, la contrainte verticale n'augmente plus et elle est remplacée par de la dilatation, alors que les contraintes horizontales continuent à augmenter ; les contraintes maximales (σ_1 et σ_2 du tenseur de contraintes) sont alors horizontales, tandis que la contrainte minimale (σ_3) est verticale. Lorsque la différence d'intensité entre contrainte maximale horizontale et contrainte verticale (le « déviateur de contraintes » au sens mécanique) dépasse la limite élastique de la roche, il y a apparition de fissures (fentes de tension), qui seront parallèles aux deux composantes maximales du tenseur de contraintes (c'est-à-dire horizontales dans le cas d'un granite).

Dans les roches isotropes comme les granites ou bien dans les roches à foliation verticale, les fissures créées seront principalement horizontales (*Figure 5a*). Dans les roches plissées (schistes et micaschistes), les fissures sont orientées de manière aléatoire (*Figure 5b*). Lorsque la foliation est horizontale, il n'y a pas d'augmentation des contraintes horizontales, et la roche gonfle comme une éponge en se feuilletant.

Dans les roches silico-alumineuses (granites, schistes, micaschistes, gneiss), les minéraux capables de gonfler en s'altérant, donc de générer une fissuration, sont en premier lieu la biotite : ce minéral est très réactif en présence d'eau car les liaisons entre feuillets, assurées par une couche d'atomes de potassium, sont assez peu énergiques. Les micas blancs (muscovite, séricite) gonflent également mais plus tardivement dans le processus d'altération, car les liaisons interfoliaires sont plus énergiques que dans le cas de la biotite. Le pouvoir de gonflement de ces minéraux est dû au fait que les phyllites à 14 Å néoformées se développent par épigénèse des phyllites à 10 Å préexistantes, en utilisant le même réseau cristallin. *A contrario*, il ne semble pas que l'altération des plagioclases, qui est aussi précoce que celle des biotites, se fasse avec augmentation de volume.

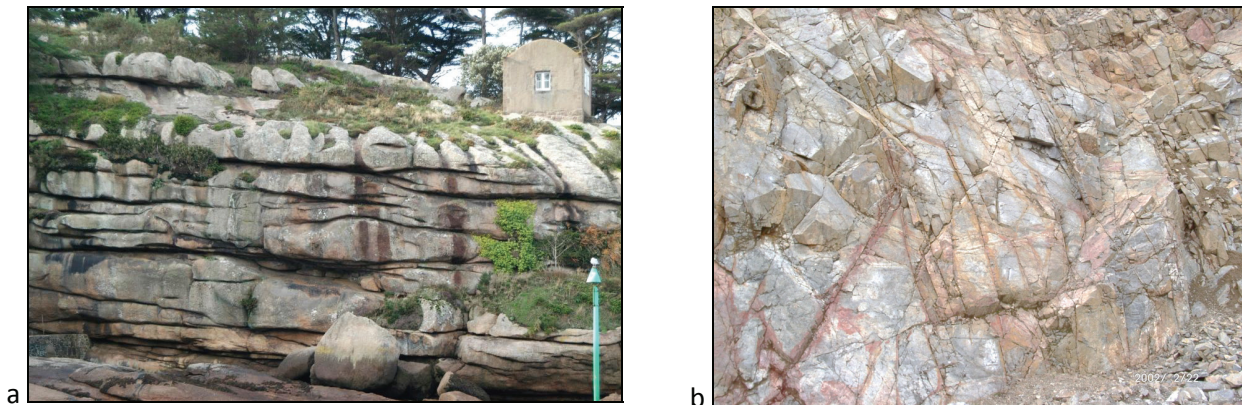


Figure 5 - a : Joints horizontaux dans le granite de Ploumanac'h (Bretagne, France) ; b : L'horizon fissuré dans des schistes gréseux (nord du Massif central)

Dans les roches basiques et ultrabasiques (dolérites, basaltes, gabbros, péridotites), l'existence d'un horizon fissuré est lié à la présence dans la roche initiale de pyroxènes et/ou d'olivine, qui semblent les seuls à avoir un caractère gonflant lors de l'altération : les amphiboles ne semblent pas gonfler et ne créent pas d'horizon fissuré développé. Les dolérites amphibolitisées lors de leur mise en place dans un milieu riche en eau, de même que les basaltes amphibolitisés par métamorphisme sont généralement peu altérés et peu aquifères. Les gabbros montrent les mêmes mécanismes de fissuration que les granites, avec des joints horizontaux. Les péridotites se fissurent avec des joints horizontaux ou anarchiques, puis évoluent par dissolution vers un comportement de karst sous couverture de saprolite.

Les roches peu altérables telles que les filons de quartz ou de rhyolite peuvent se fissurer en réponse aux contraintes générées par l'altération de l'encaissant si celui-ci est altérable (*Figure 6*). Ces filons où la fracturation intense reste ouverte permettent au profil d'altération de s'enfoncer plus rapidement car ils constituent alors des couloirs verticaux à forte perméabilité. Ces filons constituent également des drains à

forte perméabilité qui peuvent constituer des cibles pour l'implantation de forages. La largeur des filons affectés par la fracturation résultant de l'altération de l'encaissant peut dépasser 200 m.

III. 3 Contrôle minéralogique, textural et structural de la fissuration

Les facteurs principaux contrôlant le développement d'un horizon sont la minéralogie, la texture et la structure (Lachassagne et al., 2014).

Minéralogie

Seules trois familles de minéraux ont été identifiées comme capables d'augmenter de volume en s'altérant, et donc de générer un horizon fissuré : les biotites, les pyroxènes et l'olivine. Les plagioclases s'altèrent de manière précoce (comme la biotite) mais ne semblent pas augmenter de volume. La muscovite et les feldspaths potassiques s'altèrent tardivement (car l'énergie d'activation nécessaire à leur hydrolyse est plus élevée que pour les minéraux précédents), cette altération intervient alors que la roche est déjà arénisée par l'altération des biotites. Les roches à amphibole et/ou chlorite s'altèrent difficilement et ne présentent pas d'horizon fissuré développé : ce sont de piètres aquifères. Les schistes épimétamorphiques (à séricite/chlorite) sont mal documentés.



Figure 6 - Filons de quartz fracturés par les contraintes engendrées par l'altération du granite dans lesquels ils sont intrusifs (Inde)

Texture

Le premier critère textural est la taille des cristaux : les roches grenues s'altèrent beaucoup plus facilement que les roches à grain fin, et plus la taille des minéraux gonflants sera élevée, plus l'horizon fissuré pourra se développer facilement. Donc à composition équivalente, une roche plutonique se fissurera plus facilement qu'une roche hypovolcanique ou volcanique.

Dans les roches à texture lépidoblastique (gneiss, micaschistes, schistes), les micas sont orientés et l'on observe généralement, du moins pour les roches paradérivées, un litage de composition faisant alterner des niveaux riches en micas et des niveaux plus quartzo-feldspathiques. Il s'ensuit une anisotropie des plans de rupture préférentiels : les fractures générées par le gonflement des micas seront guidées par les surfaces de faiblesse de la roche.

Structure

Dans une roche où les minéraux gonflants ont une orientation aléatoire (cas des roches grenues non orientées), le potentiel de gonflement est isotrope. Le milieu étant infini dans la direction horizontale, les contraintes horizontales s'accumulent, tandis que la contrainte verticale, une fois la charge lithostatique compensée, n'augmente plus : au final on obtient des fentes de tension horizontales (Figure 7).

Pour les roches foliées mais non plissées (gneiss, orthogneiss), le pendage de la foliation joue un rôle important sur l'ouverture des fissures : lorsque la foliation est verticale, les feuilletés des micas le sont

généralement aussi, et le potentiel de gonflement s'exerce uniquement dans le plan horizontal : tout ce potentiel de gonflement est converti en contrainte horizontale, et l'on observe des fentes de tension horizontales fortement ouvertes (*Figure 8*). Des observations très intéressantes ont été réalisées en Corée du Sud sur un orthogneiss à biotite dont la foliation passe, en quelques kilomètres, d'une position verticale à une position horizontale : l'ouverture des fentes de tension diminue avec le pendage, et lorsque celui-ci est horizontal, on n'observe plus que des fentes à ouverture inframillimétrique donnant à la roche une texture feuilletée (*Figure 9*).

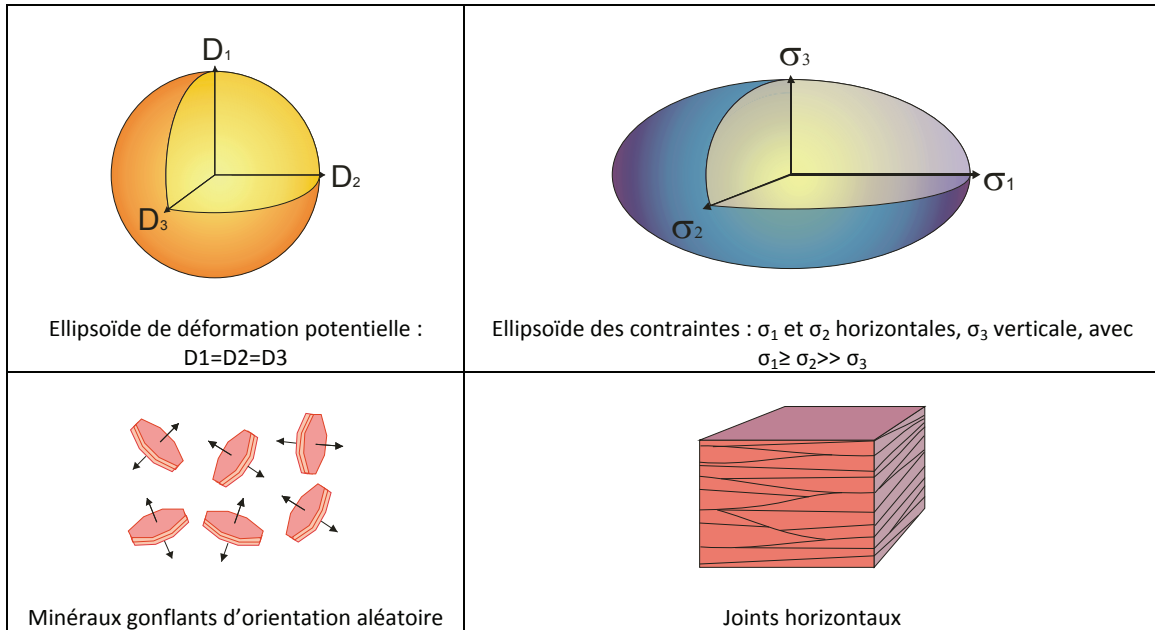


Figure 7 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche isotrope (roches grenues : granitoïdes)

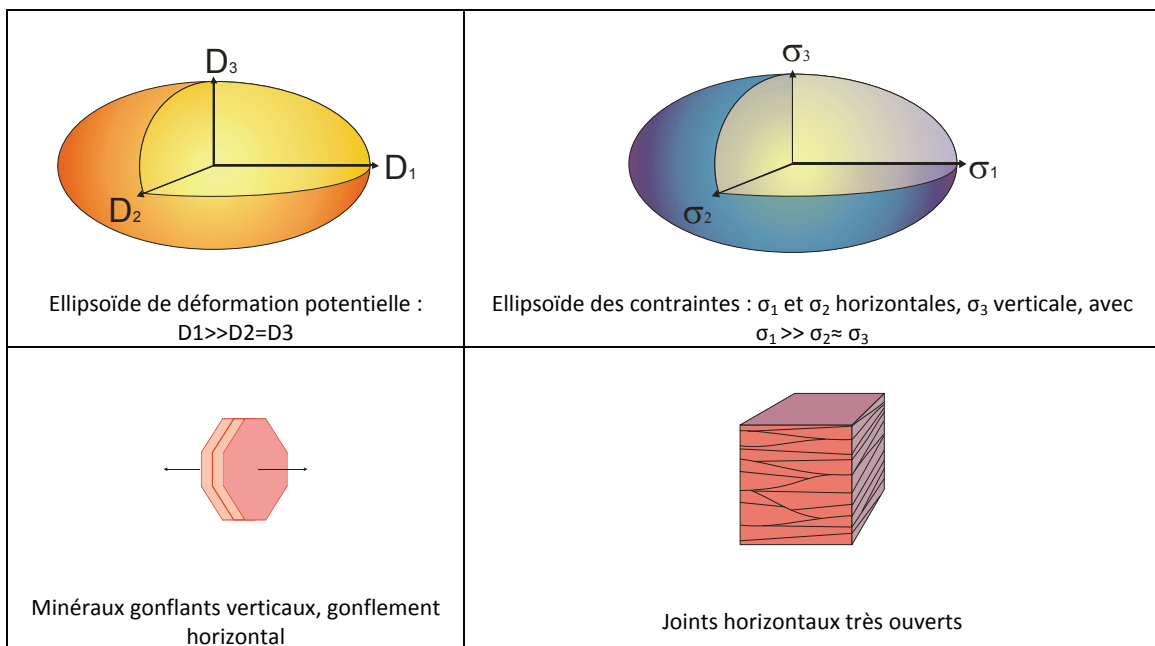


Figure 8 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche à foliation verticale

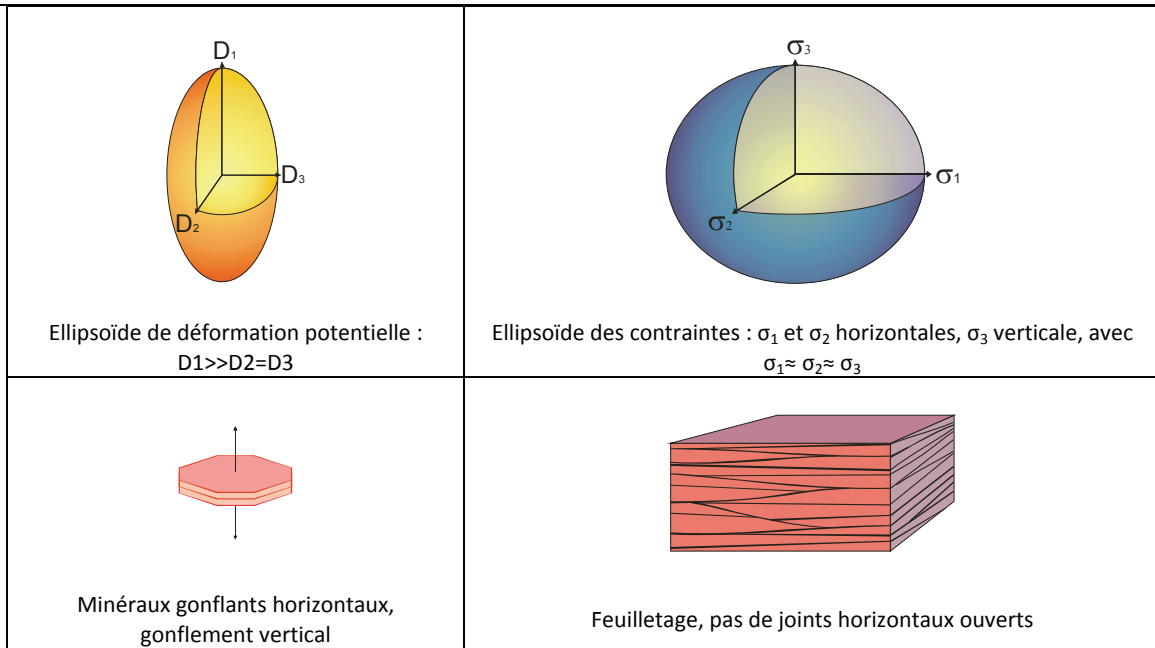


Figure 9 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche à foliation horizontale

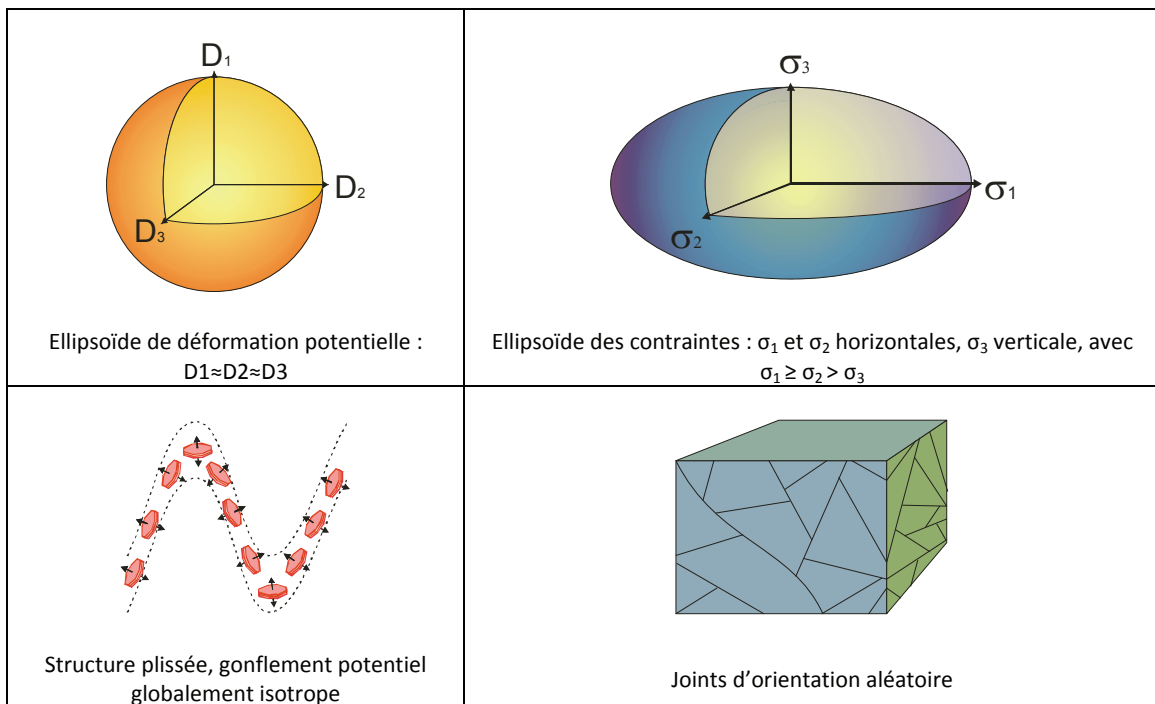


Figure 10 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche plissée (schiste, micaschiste)

Dans une roche plissée (micaschiste, schiste), la présence de plis d'échelle métrique à hectométrique modifie latéralement d'une part la position du tenseur de contraintes, puisque le gonflement se fait perpendiculairement aux feuillets des micas, mais aussi l'orientation des plans de rupture préférentiels. Une roche plissée montre généralement une orientation aléatoire des fissures générées par l'altération (Figure 10 et Figure 5b).

IV. CONCLUSIONS

A partir des observations de terrain et des études pétrographiques rappelées ci-dessus, on peut établir une hiérarchie des roches en fonction de leur aptitude à développer un horizon fissuré lors de l'altération latéritique.

Roches extrêmement favorables : roches grenues riches en minéraux gonflants : granites à biotite, granodiorites, diorites, diorites quartziques, gabbros, péridotites

Roches très favorables : granites à deux micas, gneiss, micaschistes à biotites, migmatites riches en micas.

Roches favorables : gneiss leucocrates, micaschistes, basaltes, dolérites, andésites.

Roches peu favorables : amphibolites, leucogranites à muscovite seule, granites à grain fin, metabasaltes, schistes à séricite.

Roches défavorables : roches hypovolcaniques ou volcaniques acides, microgranites, quartzites, leptynites, roches sans micas.

Références bibliographiques :

Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C., Krishnamurthy N.S. (2006) - A generalized hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330, 260-284

Lachassagne P., Dewandel B., Wyns R., (2014) - The conceptual model of weathered hard-rock aquifers and its practical applications. In: *Fractured Rock Hydrogeology*, Editors: John Sharp, Uwe Troeger. London, Taylor & Francis

Lachassagne P., Wyns R., Dewandel B. (2011) - The fracture permeability of hard rocks aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23, 145-161

Wyns R., Cornu S., Prognon C. (2014) - De la roche au sol : le régolithe. *Géosciences*, 18, pp

Wyns R.; Baltassat, J. M.; Lachassagne, P.; Legtchenko, A.; Vairon, J., (2004) Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société Géologique de France* 2004, 175, (1), 21-34

Wyns R., Quesnel F., Simon-Coinçon R., Guillocheau F., Lacquement F. (2003) Major weathering in France related to lithospheric deformation, in Paleoweathering and paleosurfaces in the Ardennes-Eifel region - Preizerdaul - Luxembourg - 14-17/05/2003, *Géologie de la France*, Orléans: Editions BRGM, Volume 1, p.79-97, 4 Fig

Wyns R., (2002) – Climat, eustatisme, tectonique : quels contrôles pour l'altération continentale ? Exemple des séquences d'altération cénozoïques en France. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 39, (2), p. 5-16

Wyns R. (1998) - Ressources en eau de la Margeride ouest - PRD 324. Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin-versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central). Rapport BRGM/RR-40191-FR, 18 p.