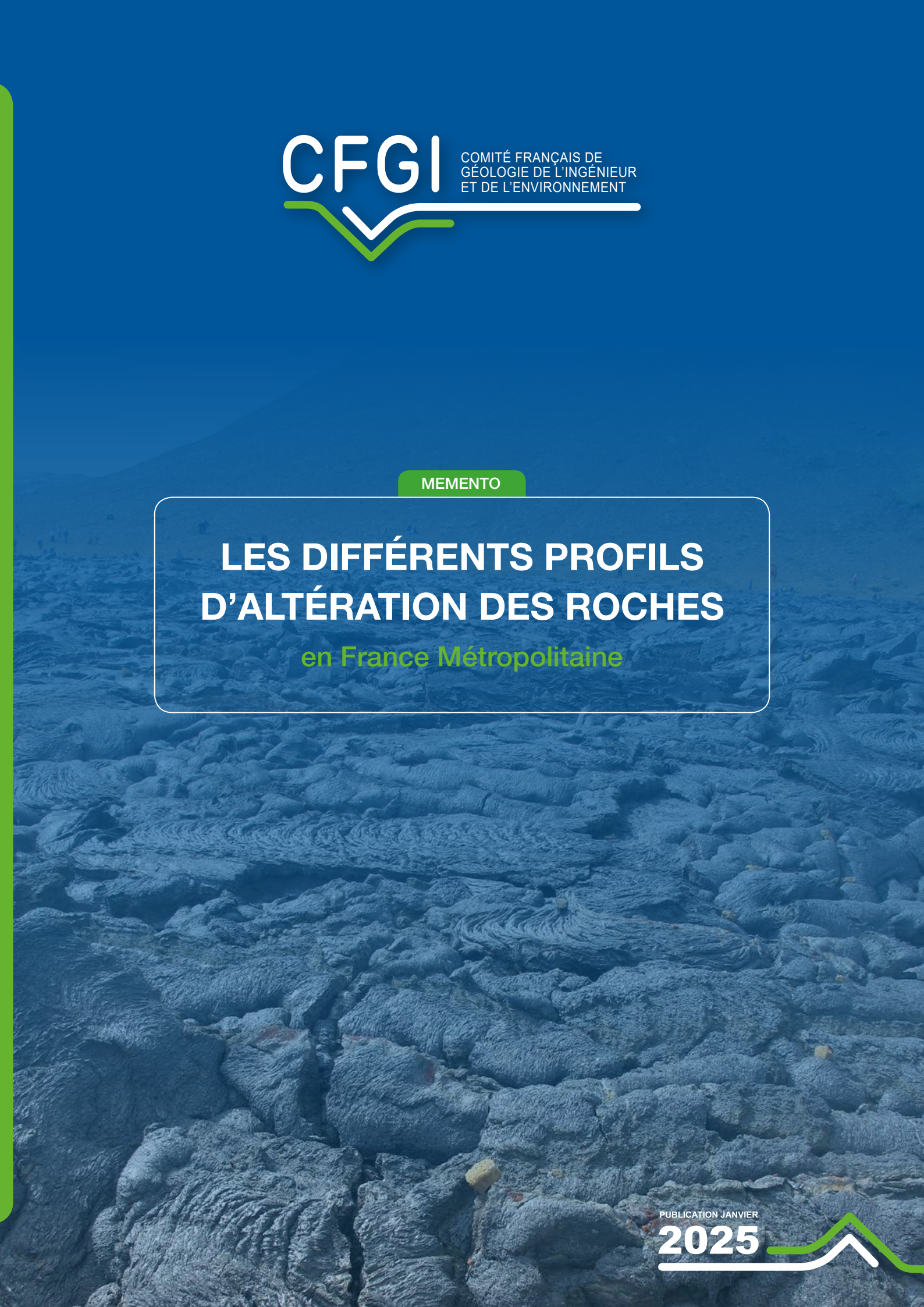
CFGI

COMITÉ FRANÇAIS DE
GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR
ET DE L'ENVIRONNEMENT

MEMENTO

LES DIFFÉRENTS PROFILS D'ALTÉRATION DES ROCHES

en France Métropolitaine



PUBLICATION JANVIER
2025

CFGI

COMITÉ FRANÇAIS DE
GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR
ET DE L'ENVIRONNEMENT

PRÉAMBULE

Cette fiche vise à vulgariser les différents profils d'altération des roches de la France métropolitaine, et en particulier les géométries possibles des horizons d'altération.

L'objectif est de fournir aux ingénieurs non géologues des clefs permettant d'optimiser les programmes de reconnaissances des sites, d'ajuster les interprétations de ces programmes (des sondages géotechniques par exemple) et de mieux intégrer dans les registres des risques les incertitudes associées aux profils d'altération.

Elle aborde, par grand type de roche :

- Une description succincte des processus d'altération, notamment à l'échelle matricielle ;
- La temporalité de ces phénomènes vis-à-vis de l'échelle humaine (l'altérabilité) ;
- La nature de la séquence d'altération ;
- L'épaisseur typique de cette séquence d'altération ;
- La géométrie possible du substratum (toit du rocher sain, au sens non altéré).

Dans un souci de simplification, cette première version ne s'attarde pas sur les spécificités liées à l'altération sous climat tropical. Il faut toutefois rappeler que la France métropolitaine n'a pas toujours connu un climat tempéré lors des âges géologiques et que certaines séquences d'altération tropicale peuvent exister et être rencontrées à proximité de la surface.

En synthèse, il convient de retenir les cinq points suivants :

1. La nature de la séquence d'altération et la morphologie du toit du rocher sain sont fonc-tion du type de roche,
2. L'épaisseur de la séquence d'altération et la morphologie du toit du rocher sain sont fonction des conditions de site,
3. Des variabilités latérales existent toujours,
4. Certains contextes sont piégeux et la définition et l'interprétation des reconnaissances géotechniques doivent toujours intégrer ces risques,
5. Il n'existe pas de méthode miracle pour caractériser l'altération.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

1. Qu'est-ce que l'altération des roches ? **6**

CHAPITRE II

2. Quels sont les profils d'altération des roches les plus communes ? **9**

2.1. Roches sédimentaires **9**

2.1.1 Marnes 9

2.1.2 Grès 10

2.1.3 Molasse 11

2.1.4 Calcaires et dolomies 11

2.1.5 Craie 15

2.1.6 Anhydrite et gypse 16

2.1.7 Sels et insolubles 17

2.2 Roches cristallines **17**

2.2.1 Roches granitiques 17

2.2.2 Gneiss et migmatites 19

2.2.3 Schistes & micaschistes 20

2.3 Roches volcaniques **21**

CHAPITRE III

3. Comment caractériser l'altération ? **24**

CHAPITRE IV

4. QUELQUES RÉFÉRENCES Pour aller plus loin **27**

I

QU’EST-CE QUE L’ALTÉRATION DES ROCHES ?

1. QU'EST-CE QUE L'ALTÉRATION DES ROCHES ?

On entend ici par altération l'ensemble des **phénomènes physico-chimiques** de dégradation in situ des minéraux et de la microstructure de la roche mère, essentiellement sous l'action des eaux de surface dans le climat tempéré métropolitain.

Evacuons d'emblée ce que l'altération n'est pas. L'altération n'est pas l'érosion car celle-ci implique un transport par définition. L'altération n'est pas non plus la fracturation du massif rocheux : cette dernière est déterminée par les familles de discontinuités, elles-mêmes caractérisées par leur espacement et extension résultant des différentes contraintes mécaniques subies par le massif rocheux au cours de son histoire géologique. Enfin, l'altération n'est pas non plus la décompression du massif rocheux qui est plutôt associée au tenseur des contraintes à proximité de la surface.

Par contre, l'altération est en lien avec le contexte tectonique, qui compartimente les écoulements des eaux souterraines : l'eau pénètre le massif rocheux par les fissures entraînant d'abord l'altération de leurs épontes puis progressivement de la matrice rocheuse. Il convient dans l'analyse de considérer l'état de contrainte tectonique, avec par exemple une fissuration fermée et une faible perméabilité au cœur de structures anticlinales ou synclinales, et la préexistence de zones de failles majeures qui, suivant le type de remplissage (roche broyée peu argilisée ou au contraire argile) peuvent jouer le rôle de drain ou au contraire de zone étanche.

Photographie 1 : micaschistes précambriens sains (= non altérés) exploités pour granulats dans le Maine et Loire © BRGM

Photographie 2 : mêmes micaschistes précambriens totalement altérés exploités pour briquetterie sur un plateau voisin © BRGM

On parle d'**altération météorique**, progressant per descensum, quand l'altération se fait par l'eau issue des précipitations. Cette altération est favorisée par toute voie permettant la circulation de l'eau de surface, généralement acide en métropole, vers la profondeur. L'action mécanique du gel de l'eau interstitielle ou fissurale déstructure le massif rocheux et parfois la matrice rocheuse. Le gel joue ainsi un rôle important dans le développement de l'altération. Les failles, comme zones broyées associées à leur cortège[1] de diaclases sont également des vecteurs de propagation privilégiés.

On parle d'**altération hydrothermale** pour celle qui est générée par des fluides chauds en provenance de la profondeur, au chimisme particulier. Celle-ci est plus rare, progressant per ascensum mais souvent spectaculaire, notamment en travaux souterrains. Elle utilise les mêmes vecteurs de propagation privilégiés que l'altération météorologique.

[1] Cortège de diaclases : ensemble de fractures de même orientation accompagnant en général une faille

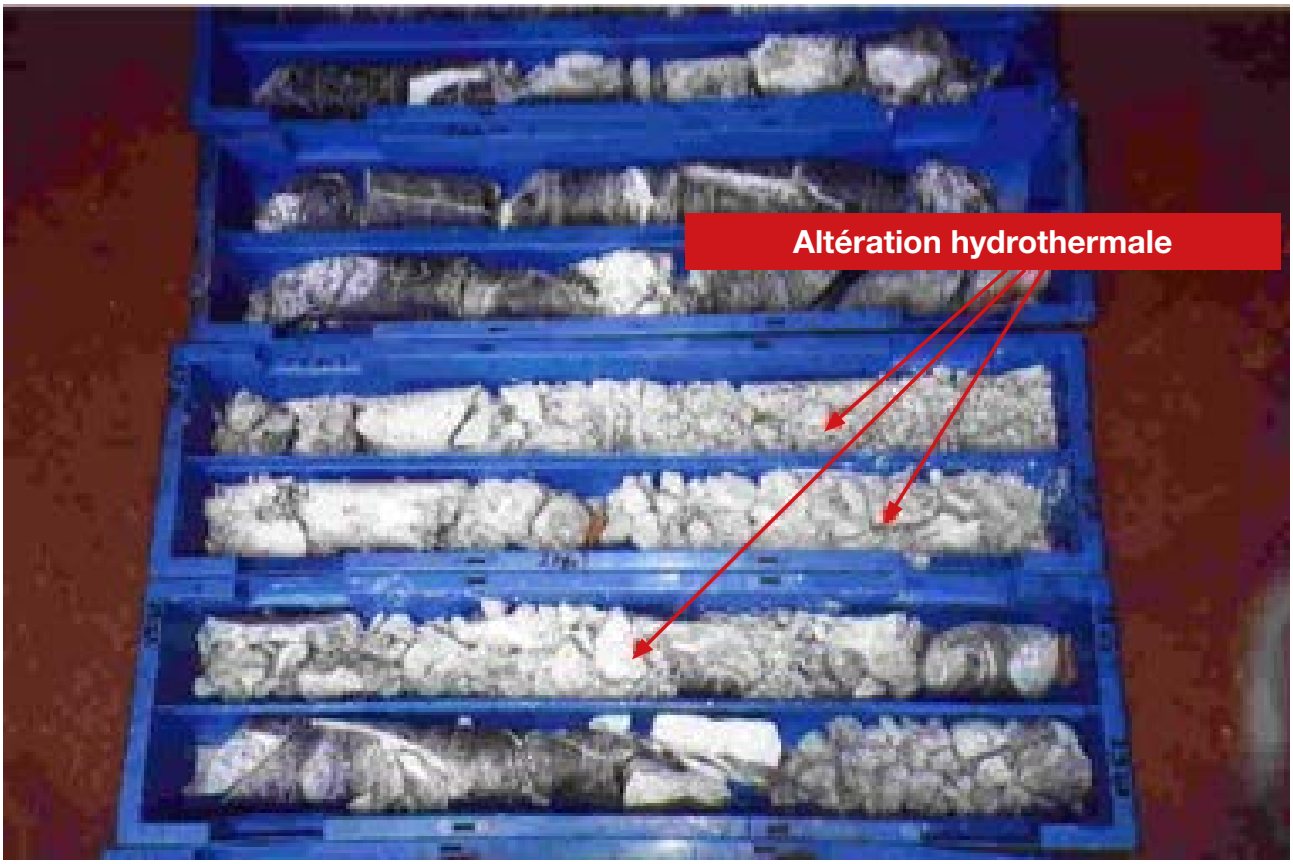
[2] Fantôme : vestige épars de roche mère saine au sein d'altérites

Les produits de l'altération sont des sols ou des roches tendres que l'on nomme **altérites**, de texture et de minéralogie liées à la nature de la roche mère. En première approche, sous le climat français métropolitain actuel, l'altération se traduit par une attaque acide des minéraux par l'eau (**hydrolyse**). Les carbonates sont dissous et les horizons d'altération des roches carbonatées sont alors formés par concentration des impuretés contenues dans la roche mère, avec parfois des fantômes[2] de cette même roche mère. Pour les roches cristallines, le quartz est non soluble, au contraire des feldspaths potassiques et sodiques, solubilisés et lessivés, l'aluminium rémanent évoluant vers des minéraux argileux. Les minéraux sombres (micas noirs, pyroxènes...) sont facilement attaqués. L'altération de certains minéraux mineurs peut s'avérer délétère (typiquement l'oxydation des pyrites).

Il résulte le développement d'une **séquence d'altération**, succession plus ou moins complète d'horizons aux frontières irrégulières, témoignant d'une intensité d'altération décroissante depuis la surface vers la profondeur. Les horizons d'altération peuvent être très différents au sein d'un même contexte (même géologie, même climat, même couverture végétale), à la fois en épaisseur et en maturité de la séquence d'altération, par exemple à la faveur de conditions locales (topographie, drainage superficiel).

En montagne, les actions mécaniques des glaciers ont souvent raboté les horizons d'altération mis en place à l'échelle géologique. L'altération peut toutefois se faire ressentir à des grandes profondeurs dans les versants affectés par des phénomènes de décompression par appel au vide ou dans le cas de fortes circulations d'eau et de massifs rocheux particulièrement discontinus.

Dans certains cas, des anciens horizons d'altération ont pu être « **fossilisés** » et n'apparaissent pas exposés à l'air libre. C'est typiquement le cas sous couverture de sols alluvionnaires de moyenne et faible énergie (colluvions, dépôts de pentes, dépôts éoliens) mais cette particularité peut également être rencontrée au toit de formations géologiques altérées lors d'une émersion datant de plusieurs dizaines de millions d'années, sous des couches sédimentaires plus récentes non altérées.



Photographie 3 : exemple de désagrégation de carottes de granitoïde par gonflements de minéraux néoformés par altération hydrothermale © EDF

II

QUELS SONT LES PROFILS D'ALTÉRATION DES ROCHES LES PLUS COMMUNES ?

2. QUELS SONT LES PROFILS D'ALTÉRATION DES ROCHES LES PLUS COMMUNES ?

Les roches les plus communes sont ici envisagées comme présentes dans un modèle géologique d'ingénierie : les profils d'altération sont expliqués et précisés pour leur bonne prise en compte.

2.1. ROCHES SÉDIMENTAIRES

2.1.1 Marnes

On entend par marne une roche correspondant à un mélange de calcaire et d'argile (pour 35% à 65 %), faisant la transition entre les calcaires et les argiles. Ce sont des roches plus ou moins raides selon leur teneur en calcaire et leur compaction par diagénèse :

- Les **marnes riches en argiles** sont rarement fracturées et leur altération est uniquement matricielle. L'eau contribue au gonflement de certains minéraux argileux, qui rompent alors les liaisons les reliant aux carbonates (altération physique), et dissout ces carbonates (altération chimique). Le modèle géologique doit donc accorder une attention particulière à la microstructure interne et à la microporosité de la marne. La séquence d'altération se traduit par un ramollissement progressif de la marne depuis la profondeur jusqu'à atteindre la consistance d'une argile en surface (en théorie, car ce cas est rare dans le contexte français métropolitain). L'épaisseur concernée par cette séquence est accentuée par la sensibilité au gel, la sensibilité au gonflement / retrait de la marne ou la présence de pyrite (sulfure gonflant en s'oxydant au contact de l'air et donnant des eaux sulfatées), tous ces facteurs privilégiant la déstructuration de la matrice de la marne. L'épaisseur de la séquence est aussi directement liée à la morphologie et aux conditions de drainage de surface, actuelles et passées. Sauf conditions exceptionnelles (par exemple contextes tectoniques particuliers où les marnes finement broyées peuvent retrouver la consistance d'une argile et donc laisser abusivement penser à une l'altération), on peut considérer que l'altération est rapidement limitée avec la profondeur ;
- Les **marnes riches en calcaires**, plus raides, sont plus fréquemment fracturées, héritage d'une tectonique cassante. Ces fractures peuvent être des voies privilégiées de pénétration de l'eau, si elles sont décomprimées (par exemple par effet de versant) et si elles ne sont pas cicatrisées par le gonflement des minéraux argileux. Dans ce cas, l'altération est à la fois une altération de matrice depuis la surface (Photographie 4) et une altération pénétrative depuis les épontes de joints, progressant depuis les épontes des fractures vers l'intérieur de la masse rocheuse.

Photographie 4 : pénétration matricielle dans une marne
© J. Kasperski

L'altération des marnes noires du Lias, en Lorraine ou en Bourgogne par exemple, produit au final des argiles plastiques marneuses, de couleur beige, marron ou grise, remaniées sur les versants par fluage et glissements. Sous ces formations de pente, les marnes en place subissent une altération diminuant avec la profondeur, pouvant atteindre la dizaine de mètres d'épaisseur (Figure 1). Les «schistes cartons» en particulier sont très altérables : ouverture et désagrégation des lits.

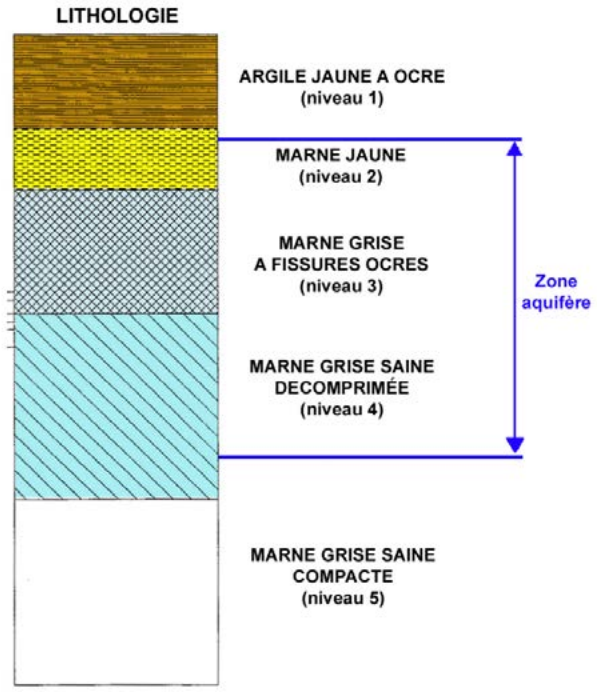


Figure 1 : séquence schématique de l'altération des marnes doméniennes de Lorraine © EDF

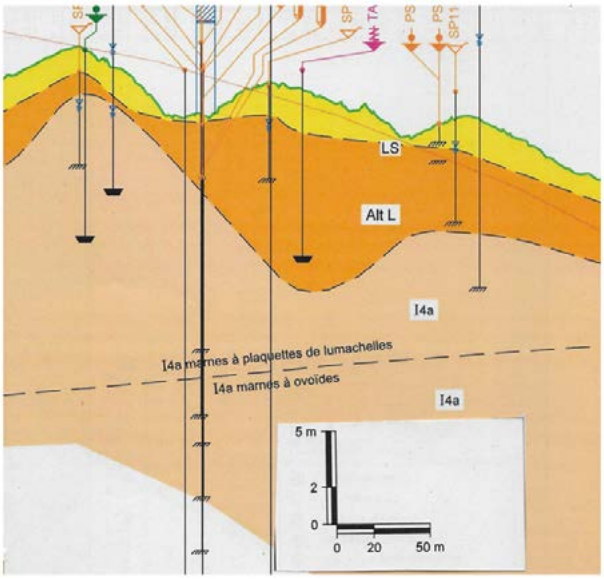


Figure 2 : variations d'épaisseur des marnes altérées (Alt L) sous les formations remaniées de surface (LS)
(source : études A 304, DREAL Champagne-Ardenne/EGIS)

2.1.2 Grès

Le grès peut être considéré comme un agglomérat de grains de sables (généralement quartzeux, parfois feldspathiques) liés par un ciment. La nature du ciment tient un rôle prépondérant dans le processus d'altération :

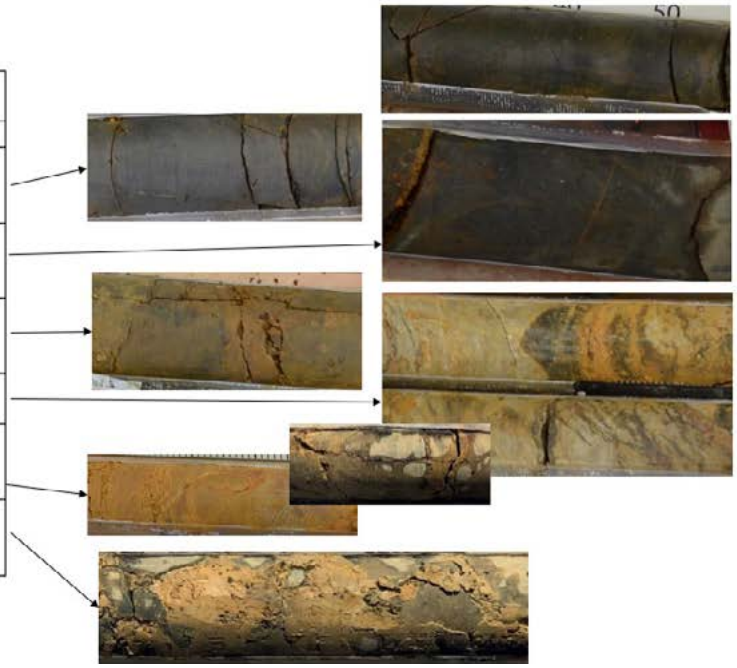
- Lorsque le ciment est calcaire, il est très sensible à la dissolution acide par les eaux de surface, jusqu'à disparaitre. Lorsque les grès sont fracturés, l'altération matricielle depuis la surface combinée à l'altération pénétrative depuis les épontes de discontinuités donne la séquence d'altération suivante : progressivement du grès sain (roche mère) au sable en surface, avec perte progressive de cimentation (grès tendre), vestiges fantômes de la roche (grès durs au sein de grès tendres, ou grès tendres au sein de sables). Le profil du toit du rocher sain peut donc être très tourmenté ;
- Lorsque le ciment est argileux, le processus d'altération est essentiellement physique, avec lessivage des matériaux argileux et mise à nu des grains de sable. La séquence d'altération est analogue à celle du ciment calcaire ;
- Lorsque le ciment est siliceux, on parle de quartzite, roche pratiquement inaltérable sous climat tempéré, hors contexte tectonique extrême pouvant broyer le quartzite et le transformer en sol sableux fluant sous fortes contraintes.

A noter qu'il est commun de rencontrer, au sein d'un massif de grès, des zones peu grésifiées, voire des zones franchement sableuses. Ces sables ne sont pas nécessairement le résultat de l'altération du grès, ils peuvent correspondre à une grésification imparfaite du sable originel, qui n'a donc jamais été cimenté. Hormis ces cas particuliers, on peut considérer que l'épaisseur de la séquence est limitée à quelques mètres et que l'altération disparait rapidement avec la profondeur, sauf localement à la faveur de phénomènes d'altération hydrothermale.

Grès / Alternance ou mélange gréseux

Classes AFTES	Termes descriptifs du degré d'altération du massif rocheux
AM1a	**Rocher sain**
AM1b	**Rocher faiblement altéré** Altération limitée aux surfaces de discontinuités principales ; rocher sain dans la masse
AM2	**Rocher légèrement altéré** Altération faible dans la masse rocheuse mais bien développée sur les discontinuités
AM3	**Rocher modérément altéré** Altération bien visible dans toute la masse rocheuse mais matériau non friable
AM4	**Rocher très altéré** Forte altération dans toute la masse rocheuse
AM5	**Rocher complétement altéré** La texture et les fissures importantes sont toujours visibles
AM6	**Rocher complétement décomposé** Texture et fissuration reconnaissables Sol résiduel - Pas de remaniement

Tableau 2 : Classes d'altération AFTES



Photographie 5 : faciès d'altération des grès armoricains du Cotentin © EDF

2.1.3 Molasse

La molasse est une succession de lentilles de toutes dimensions de grès et conglomérats (à ciment généralement argileux) et de lits plus ou moins continus de matériaux marneux.

Le processus d'altération de la molasse est analogue celui des grès mais la pénétration de l'eau en profondeur est fortement ralentie par les lits marneux qui agissent comme des barrières étanches. L'épaisseur de la séquence d'altération est en général faible, même si des surépaisseurs peuvent localement exister dans les zones où les lits marneux sont moins fréquents ou discontinus. D'une manière générale, la molasse est une roche évolutive, c'est-à-dire que sa cinétique d'altération peut être rapide.

2.1.4 Calcaires et dolomies

Les calcaires, principales roches carbonatées sont formés essentiellement du minéral calcite ($CaCO_3$). On rencontre souvent des calcaires impurs : calcaires marneux, calcaires gréseux, calcaires ferrugineux, calcaires dolomitiques. Les dolomies sont des roches carbonatées formées principalement de dolomite ($CaMg(CO_3)_2$).

La dégradation de ces roches se fait principalement par **dissolution des carbonates**. La calcite est peu soluble dans l'eau pure mais bien plus dans une eau qui a dissous du CO_2. On a en particulier la réaction :

$$CaCO_3 + H2O + CO_2 => Ca^{++} + 2[HCO_3]^-$$

Pour les calcaires, la dissolution est active en surface avec la formation de lapiez (Photographie 6 & Photographie 7) et en profondeur là où l'eau circule et se renouvelle le long des joints stratigraphiques, des diaclases (Photographie 8) et des failles. Cette dissolution peut aboutir à la création d'un réseau karstique développé et à des vides de grandes dimensions. La vitesse de dissolution de ces roches est trop faible pour être sensible à l'échelle de la durée de vie d'un ouvrage et les vides qui présentent des risques d'effondrement sont des karsts hérités de plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'années au moins.

Photographie 6 : lapiez de petite taille dans des calcaires (Var) © JL Durville

L'altération des dolomies saccharoïdes produit, par décohésion, du sable dolomitique (magnésien). La calcite étant plus soluble que la dolomite on observe une altération différentielle dans les massifs carbonatés hétérogènes : cela forme les classiques reliefs ruiniformes (Photographie 9).

De tels reliefs peuvent aussi se rencontrer enfouis sous un recouvrement superficiel, alluvionnaire notamment, impliquant une très grande attention dans de tels contextes géologiques carbonatés hétérogènes.

Les résidus issus de la dissolution des carbonates dépendent de la composition initiale de la roche en surface des massifs calcaires, on observe souvent une **argile de décalcification**, colorée par les oxydes de fer (terra rossa), mêlée de sable, de débris carbonatés, de silex ou de rognons siliceux (chailles). L'épaisseur est très variable, jusqu'à une dizaine de mètres. Ces formations meubles de surface sont souvent entraînées en profondeur dans le karst sous-jacent et on peut les rencontrer emplissant des fractures ou des cavités.

Notons que ces argiles résiduelles sur les formations calcaires peuvent être très anciennes : celles de l'ouest du Bassin parisien ont pu se développer durant tout le Tertiaire. Les bauxites du sud de la France sont des remplissages de karsts encore plus anciens.

Photographie 7 : lapiez calcaires dans le lit de la Valserine (Ain) © JL Durville

Photographie 8 : karst dans une carrière de calcaire de pierre de taille (Lutétien) du Vexin, comblé par des terres de surface © JL Durville

Photographie 9 : cirque de Mourèze (Hérault) : relief ruiniforme des calcaires dolomitiques. © V. Landrin.

Photographie 10 : karst dans les dolomies du Jurassique moyen, comblé au Crétacé par la bauxite ©JL Durville

La présence de poches argileuses et de rognons résiduels carbonatés, souvent très dégradés, fait que la morphologie de l'interface entre argiles et calcaires sains peut être très complexe (Photographie 11). Pour la réalisation de fondations par exemple, les reconnaissances dans de tels sites doivent être particulièrement soignées (Curtil & Legrand, 2008) et, même dans ce cas, on n'est pas à l'abri de surprises (Figure 3).

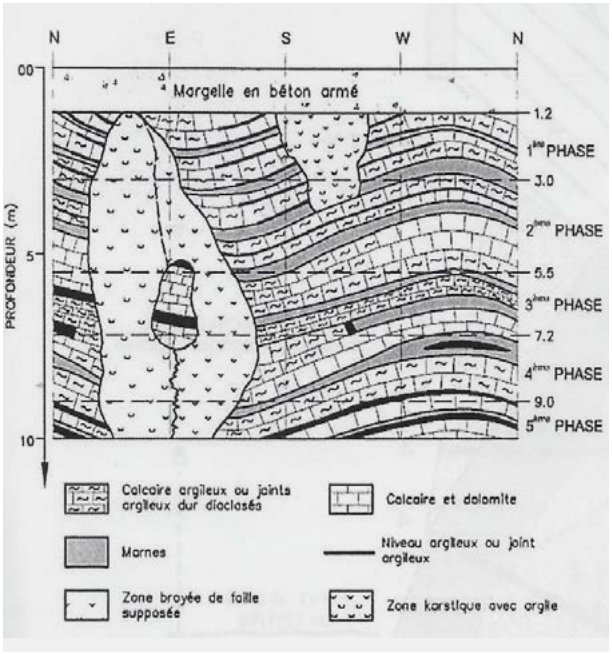


Figure 3 : relevé géologique d'un puits de la pile P4 du viaduc de Millau, montrant des calcaires du Carixien complètement disloqués dans une zone de faille. La zone de karst remplie d'argile a été remplacée par du béton (d'après Guilloux, 2013).

Photographie 11 : décapage du toit rocheux de calcaires primaires, Chine © EDF

Un trait caractéristique de la morphologie karstique est la présence de dolines sur les plateaux calcaires : ce sont des dépressions de surface, plus ou moins circulaires, dont le fond plat est constitué d'argile de décalcification. Elles constituent des points d'infiltration des eaux météoriques et peuvent évoluer par soutirage progressif ou débourrage brutal.

Les **effondrements en surface** se produisent le plus souvent après de fortes précipitations ou lors d'un décapage superficiel dans les chantiers. Lorsque des formations meubles recouvrent un calcaire karstifié, par exemple dans la plaine alluviale de la Loire aux environs d'Orléans (calcaire lacustre de Beauce, âge Aquitanien), le risque de fontis est lié au débourrage de vides karstiques (particulièrement fort lors d'épisodes de hautes eaux ou de fortes pluies) et à la remontée brutale du fontis à travers les alluvions (Noury et al., 2018). En définitive, les risques en surface ont trois origines : effondrement du toit rocheux d'une cavité karstique très peu profonde, débourrage d'un conduit karstique ou soutirage de matériaux de couverture vers un conduit karstique (BRGM-Cerema, 2023).

A cause de ces phénomènes d'altération très localisée le long de réseaux karstiques, on considère que les processus d'altération des carbonates peuvent s'étendre très profondément. La profon-

deur maximale est en lien avec l'histoire géologique régionale, notamment les périodes d'enfoncement des cours d'eau ou de régression marine.

En **travaux souterrains**, la rencontre d'une cavité karstique peut être dangereuse par suite d'une vidange brutale d'eau ou de matériaux issus de la cavité et du réseau karstique sus-jacent (Figure 4).

La **gélifraction** est une forme typique de dégradation des roches carbonatées. La transformation d'eau en glace dans des roches saturées ou quasi saturées engendre des contraintes qui peuvent développer la fissuration et in fine contribuer à la dégradation superficielle de la roche. Si les roches très peu poreuses (n < 2 %) ne sont pas gélives, le gel dans de petites fractures superficielles peut aussi avoir un effet mécanique destructeur. Le gel pendant les périodes froides du Quaternaire est à l'origine de l'accumulation de débris sur les versants surmontés par des plateaux calcaires : les grèzes ou groises (Campy & Macaire, 1989). Une altération périglaciaire peut aussi s'observer dans la partie supérieure de certains calcaires, sous des recouvrements de limons ou d'alluvions : calcaire de Beauce par exemple (Lorain, 1973).

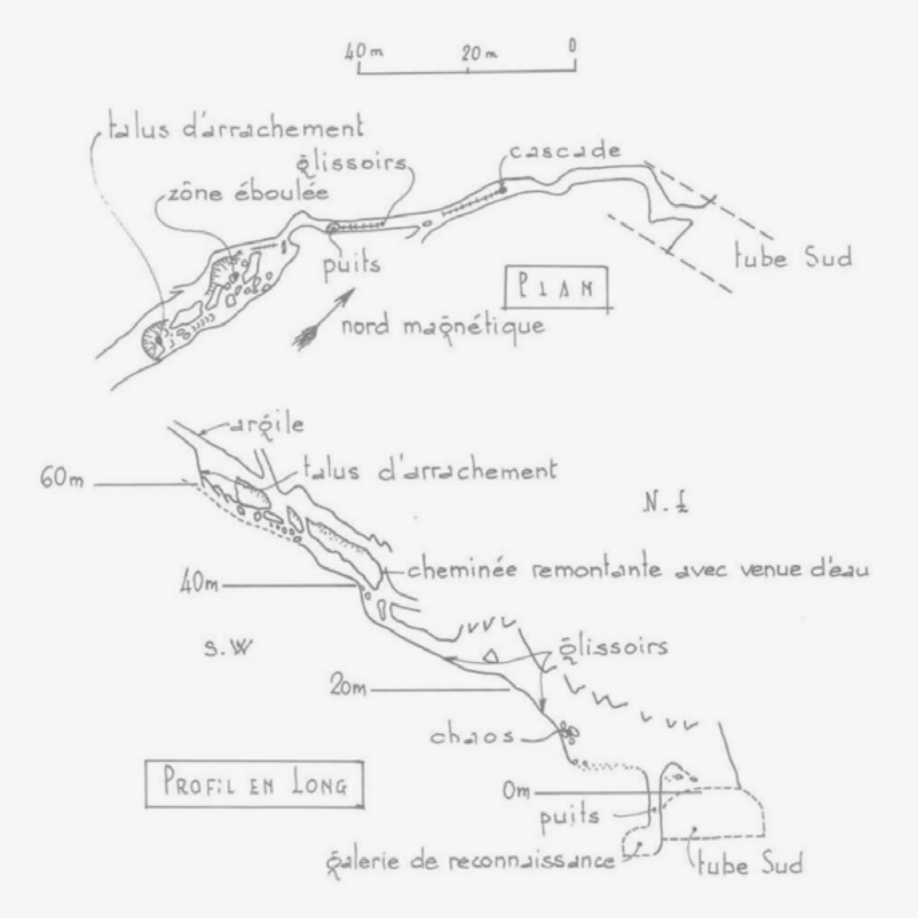


Figure 4 : karst rencontré dans le calcaire du Barrémien au tunnel du Chat (d'après Darcy, 1979)

2.1.5 Craie

La craie est formée par agglomération de squelettes carbonatés de micro-organismes marins. Au sein des horizons de craie, sont présents des silex et des chailles dans des proportions plus ou moins importantes. Ceux-ci sont parfois organisés en de véritables bancs quasi-continus armant notamment les falaises normandes. Par son mode de dépôt, la craie peut être jalonnée de fond durcis qui correspondent à des surfaces d'arrêt temporaires de la sédimentation marine.

La séquence d'altération, lorsqu'elle est complète (c'est-à-dire protégée de l'érosion par un dépôt alluvial), est classiquement la suivante (Figure 5) :

- Craie pâteuse : la matrice est totalement déstructurée, des éléments décimétriques de craie dure sont emballés dans une matrice pâteuse peu plastique et l'ensemble peut être parcouru de micro-canalicules. L'épaisseur de craie pâteuse peut atteindre, dans des circonstances particulièrement favorables de conservation, plusieurs mètres ;
- Craie altérée et fissurée : la matrice laisse entrevoir les éléments de stratification ou de fissuration. Les éléments de craie dure sont plus gros que dans la craie pâteuse, jusqu'à plusieurs décimètres. L'épaisseur peut varier, notamment en fonction du relief, jusqu'à plus de dix mètres ;
- Craie saine, fissurée dans sa partie supérieure.

La craie restant un carbonate, elle est sujette aux phénomènes de karstifications. Par sa faiblesse mécanique, les figures associées ne sont jamais des cavités importantes et sont souvent comblées par des formations superficielles. On y observe des voûtes de décharge, témoins d'effondrement lorsque la cavité a dépassé son facteur de stabilité, ou des conduits erratiques, souvent guidés par la stratification ou les fonds durcis. A proximité de la surface, des entonnoirs de dissolution peuvent exister, avec dans ce cas possible sous tirage des alluvions sus-jacentes.

A proximité de la surface, l'altération météoritique et l'érosion grignotent en continue cette séquence. Il en résulte parfois, lorsque la roche mère était riche en silex, des accumulations plurimétriques de rognons siliceux noyés dans un matrice plus ou moins argileuse (kaolinite et illite prédominantes), donnant par endroit l'impression d'une véritable couche sédimentaire alors qu'il s'agit d'un résidu insoluble après dissolution du carbonate de calcium. Cet horizon reste par définition souvent d'épaisseur et de consistance variables, voire de continuité localement interrompue, par exemple à la faveur d'un paléo relief le long duquel l'érosion hydraulique a pu chasser les silex.

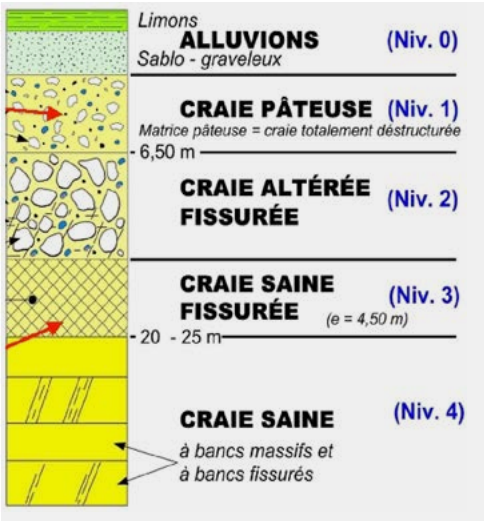


Figure 5 : profil schématique d'altération de la craie sénonienne © EDF

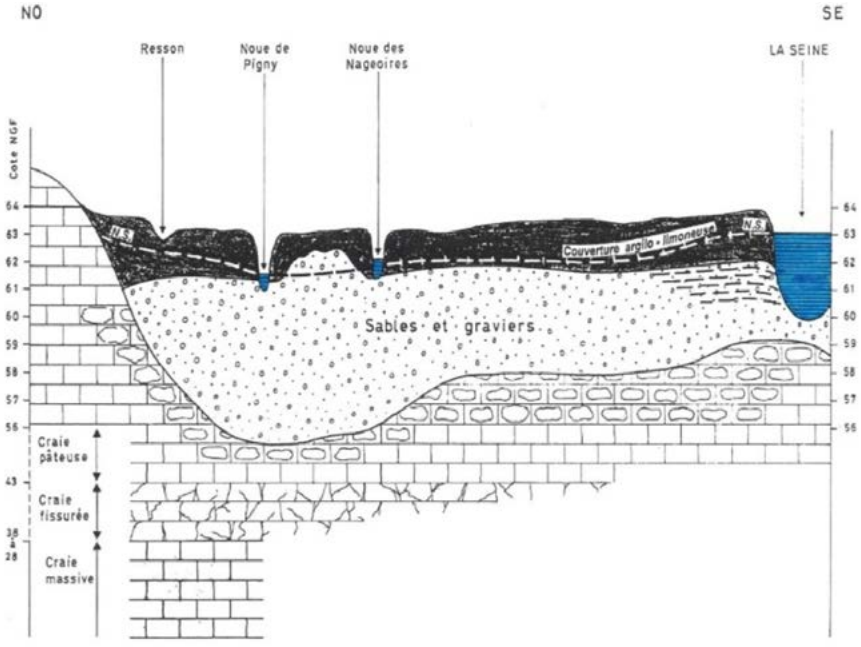


Figure 6 : coupe schématique du site de Nogent sur Seine © EDF

2.1.6 Anhydrite et gypse

L'anhydrite ($CaSO_4$) et le gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$) sont des roches salines ou évaporitiques. Ces deux minéraux sont très solubles, d'autant plus que les eaux qui percolent à leur contact sont faiblement chargées en ions sulfates. Ce sont ces processus de solubilisation qui commandent l'altération de ces matériaux, qui peut être très rapide, de l'ordre de quelques mois ou années dans les conditions favorables.

Mise en présence d'eau, l'anhydrite se transforme en gypse, avec en milieu ouvert (eau apportée de l'extérieur du système, ce qui est le cas le plus courant) un gonflement relatif théorique de 61 % et la possibilité de développer de fortes pressions de gonflement en milieu confiné.

Photographie 12 : gypse et anhydrite © JL Durville

En cas d'apport d'eau fortement renouvelée, il y a solubilisation de l'anhydrite, sans même passer par la formation de gypse, ce qui peut conduire à l'élargissement de fractures par dissolution, voire au développement de karst dans l'anhydrite elle-même. Dans ce même type de condition, le gypse aussi est l'objet de karstifications importantes, avec formations de cavités plus fragiles que pour l'anhydrite car la résistance mécanique du gypse (et des massifs gypseux) est en général plus faible que celle de l'anhydrite (et des massifs d'anhydrite, du moins s'agissant de masses d'anhydrite saine et pure). Il peut s'en suivre des remontées de cloches de fontis, des affaissements en surface ou parfois des venues au jour plus ou moins brutales de fontis, en forme « d'entonnoirs » ou de « puits ».

L'altérabilité de ces roches est liée aux conditions de « gisement » à différentes échelles : texture de la roche, porosité, fissuration, présence d'impuretés, présence d'autres matériaux associés : argiles et schistes, zones de fractures, surfaces exposées à l'air et à l'eau, minéralisation de l'eau, possibilité de circulation et de renouvellement de l'eau qui les traverse.

A une échelle locale (celle de l'échantillon décimétrique à métrique) on peut observer que la transformation de l'anhydrite en gypse par apport d'eau a tendance à colmater les fissures (du fait de l'augmentation de volume) et à contrarier l'arrivée de l'eau vers des zones plus profondes ou plus confinées. De ce fait, des masses d'anhydrites pures, compactes et non fissurées peuvent être considérées comme des roches non gonflantes.

A une échelle moins locale (celle du massif rocheux), il faut prendre en compte tous les types de surfaces de contacts possibles entre d'une part le gypse ou l'anhydrite, et d'autre part l'eau disponible : l'eau du massif et pour des ouvrages souterrains l'eau atmosphérique et l'eau circulant au niveau des interfaces des revêtements de génie civil et dans les différents dispositifs de drainage pas toujours étanches. C'est plus souvent cette situation à l'échelle du massif qu'il convient de prendre en compte pour comprendre les questions de dissolution de gypse et d'anhydrite et de gonflement de l'anhydrite.

La Figure 7 donne un exemple d'évolution latérale du gypse lutétien, qui présente une altération très particulière où la silice et la calcite se sont substitués au gypse.

L'anhydrite est pratiquement absente de la subsurface par transformation en gypse dans les conditions de circulation de la nappe phréatique. L'interface entre l'anhydrite et le gypse est souvent très complexe, les processus décrits ci-dessus conduisant à des interpénétrations des deux matériaux. Ce même gypse peut affleurer sous forme de grosses masses dans les reliefs, surtout s'il est riche en impuretés, parcourus par des figures d'érosion liées à la circulation des eaux de pluie.

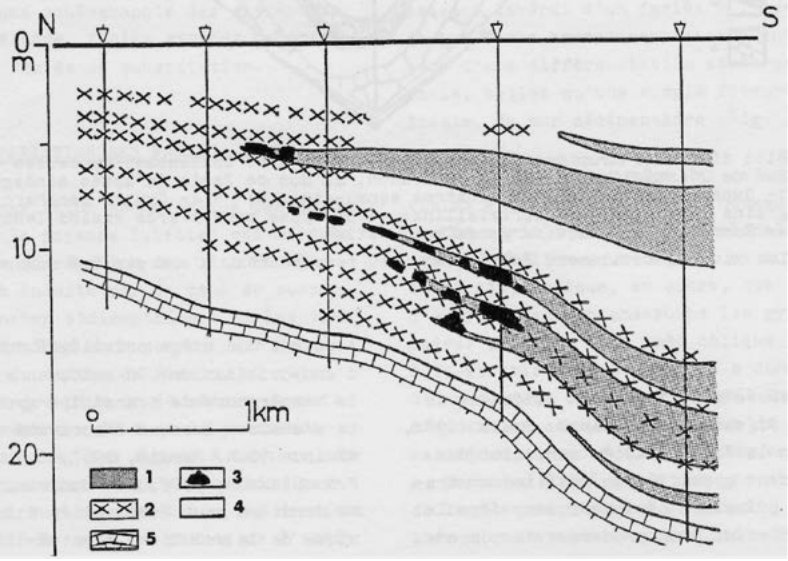


Figure 7 : Zonalité des faciès gypseux sensu-stricto et des épigénies siliceuses et calcitiques du Lutétien supérieur sur le flanc nord du Synclinal de la Seine à Sevran (93) (Toulemont, 1987)

2.1.7 Sels et insolubles

Les sels (halites, …) sont absents de la subsurface à cause de leur très forte solubilité. Leur dissolution peut laisser place, dans certaines configurations, à des sols formés par accumulation des impuretés et des insolubles initialement présents dans la séquence évaporitique.

2.2 ROCHES CRISTALLINES

2.2.1 Roches granitiques

Les différences pétrographiques et minéralogiques peuvent entrainer des nuances dans l'épaisseur et la nature des horizons d'altération sans remettre en cause le modèle global.

L'altération des massifs granitiques est une altération pénétrative depuis les épontes de joints, c'est-à-dire que l'hydrolyse des feldspaths et des micas progresse depuis les fractures du massif rocheux. La séquence d'altération se traduit donc en une perte progressive de la cohésion matricielle depuis la profondeur vers la surface et une perte progressive de la cohésion depuis le cœur du massif vers les épontes de principales fractures. Cette perte de cohésion provient de l'altération des feldspaths et des micas noirs. Le stade ultime de l'altération est une altérite formée, en proportions variables, de sables quartzeux et de minéraux argileux : exemple des arènes granitiques du Massif Central , avec typiquement 15 à 35 % de passant à 80 microns).

Un stade intermédiaire de cette altération du massif rocheux est la présence de « boules » de granite au sein d'altérites.

Ces processus d'altération sont très lents sous climats tempérés (supérieurs à l'échelle humaine). Par contre, le déconfinement de granites altérés hydrothermalement peut donner lieu à des phénomènes très spectaculaires de gonflement et d'effritement par hydratation de minéraux d'altération gonflants. Le modèle géologique doit donc s'attacher à décrire la structuration interne du massif par diaclases et fractures profondes et failles qui favorisent la pénétration de l'eau.
L'épaisseur de la séquence est directement liée :

- A la nature même de la roche, en particulier sa pétrographie (un granite à gros cristaux est plus sensible à l'altération qu'un granite à petits cristaux) et sa minéralogie ;
- A la fracturation et à la microfissuration du massif rocheux ;
- A la décompression du massif rocheux ;
- Aux conditions de drainage de surface, actuelles et passées. La séquence est complète et puissante sur les plateaux des massifs anciens ;
- Aux conditions de topographie : par exemple, le dégagement des altérites en conditions de versant peut mener à la présence de chaos rocheux avec une roches saine en place à très faible profondeur.

Le rocher sain sensu stricto n'est en général atteint qu'à grande profondeur (plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres), l'altération demeurant à proximité des fissures, par exemple par un fin liseré le long des diaclases. Cette altération sur fissures, qui peut se traduire par un liseré de minéraux à feuillets, peut significativement affaiblir les résistances de la masse rocheuse.

Photographie 13 : Rocher sain et gore sableux, Corse © EDF

Photographie 14 : altération hydrothermale et altération météorique, Normandie © EDF

Photographie 15 : filon de microganite altéré, Limousin ©BRGM

Photographie 15 : talus dans des leucogranites à grain moyen à muscovite dominante, totalement altérés, Limousin © @BRGM

2.2.2 Gneiss et migmatites

Les phénomènes d'altération en jeu sont analogues à ceux décrits pour les granites : ce sont des phénomènes très lents d'hydrolyse des feldspaths et des micas. La particularité de l'altération des gneiss et migmatites tient toutefois en l'anisotropie de ces roches :

- la foliation pénétrative est un chemin privilégié et orienté pour l'entrée de l'eau dans le massif, surtout pour les gneiss ;
- le regroupement des minéraux en bandes conduit en une altération différentielle entre les amas riches en micas et le reste de la masse rocheuse, surtout pour les migmatites.

L'altération est d'autant plus profonde que la foliation est redressée. Dans les conditions topographiques de faible érosion (conditions de plateau), l'épaisseur de la séquence d'altération peut dépasser plusieurs mètres et l'interface avec le substratum sain sensu stricto n'est jamais franc, comme pour les granites. La géométrie du massif sain peut être très irrégulière avec de fortes variations d'épaisseur, surtout si la foliation est redressée.

Le modèle géologique doit donc s'attacher à décrire la structuration interne du massif et notamment les variations de pendage et d'orientation de la foliation.

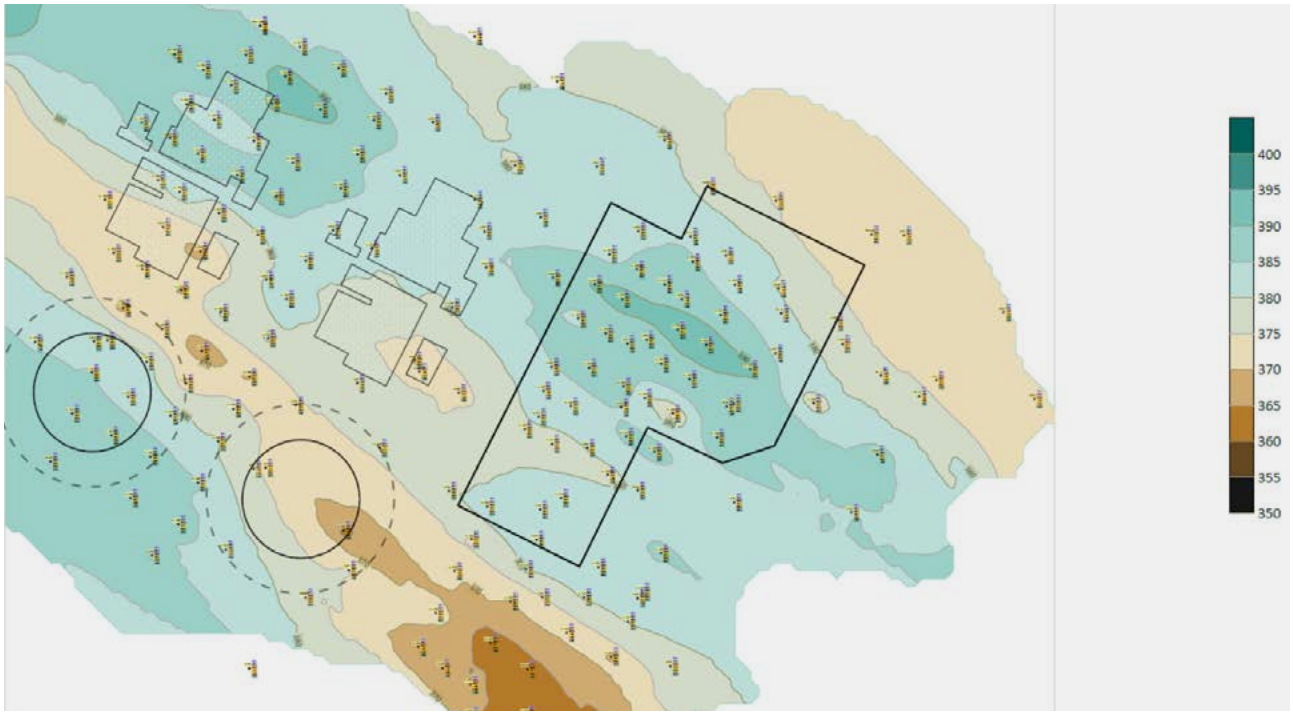
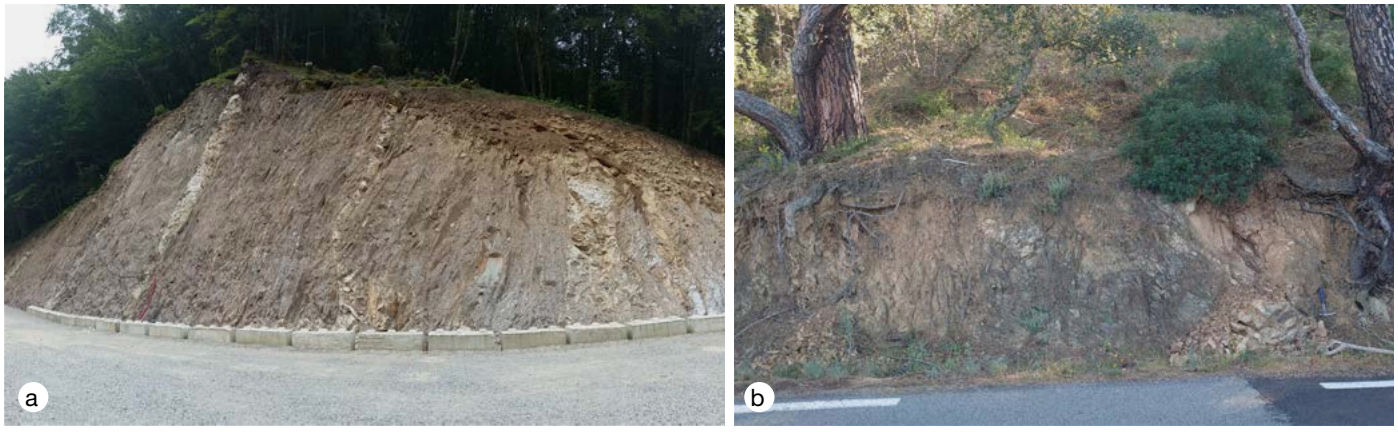


Figure 8 : topographie souterraine (en mètres au-dessus du niveau de la mer) du toit rocheux d'un site nucléaire montrant l'orientation de la foliation qui pilote l'altération © EDF

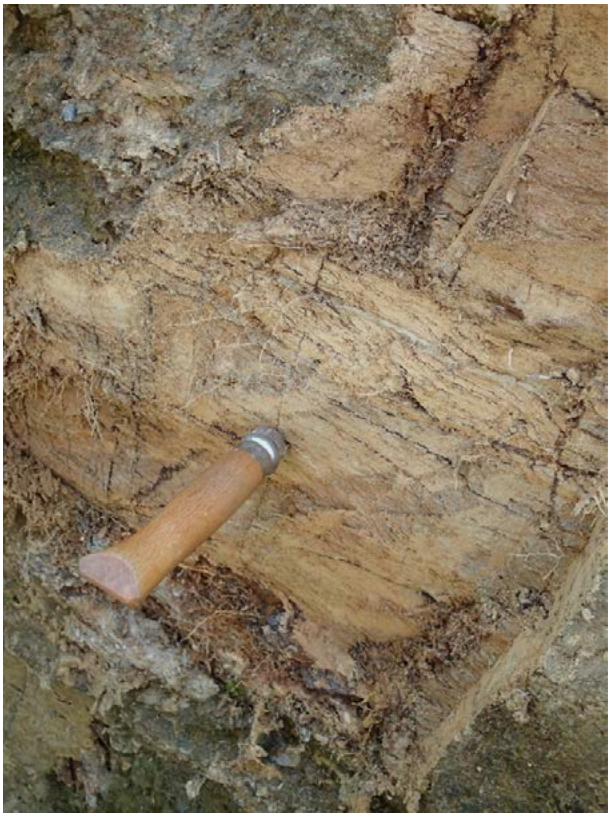


Photographies 17a : gneiss altérés, Massif central © EDF - Photographies 17b : massif des Maures © BRGM

2.2.3 Schistes & micaschistes

Les micaschistes sont des roches métamorphiques riches en minéraux phylliteux (micas noirs, micas blancs...), avec aussi du quartz, de la calcite (calcschistes, tels les «schistes lustrés» des zones alpines), de la chlorite (schistes chloriteux), des amphiboles, etc. et qui présentent une foliation marquée. Des lits de quartz sont fréquemment visibles (photographie 12) et marquent les plis. Les schistes faiblement métamorphisés, comme les schistes briovériens du Bassin rennais, sont des siltites ou des argilites qui ont acquis une structure en feuillets. Les schistes ardoisiers sont des schistes à grain fin, riches en quartz, finement foliés, résistants, en général peu altérables.

L'altération concerne principalement les minéraux phylliteux, notamment les micas noirs qui s'altèrent en chlorites. *In fine*, on a un développement d'argiles et le gonflement des minéraux foliés facilite la déstructuration de la roche et la pénétration de l'eau qui engendre l'hydrolyse des minéraux.



Photographie 18 : altération des micaschistes à chorite, Massif Armoricain ©BRGM

L'altération peut être ancienne avec par exemple les altérites rencontrées au sommet du socle métamorphique dans le nord du Massif Central, sous les sédiments mésozoïques. Ces altérites possèdent une épaisseur pouvant dépasser une vingtaine de mètres. L'altération a pu reprendre lorsque la surface du socle a été exhumée par érosion des terrains sédimentaires sus-jacents.

L'altération pénètre profondément lorsque la schistosité est très redressée, en particulier au voisinage des bancs les plus grossiers où l'eau circule plus facilement. L'épaisseur altérée peut ainsi se limiter à 2-3 m pour un (mica)schiste à faible pendage et dépasser 10 m pour la même roche en pendage quasi-vertical. L'altération se développe plus facilement dans les lits riches en feldspaths, micas ou chlorites que dans les lits riches en quartz.

L'altération chimique est maximale dans les zones à faible pente (surface de plateaux, ...), là où les eaux percolent lentement et restent longtemps en contact avec le substratum. L'épaisseur d'altération y est donc plus importante que sur les versants, où l'eau circule plus facilement et dégage en permanence les terrains altérés devenus érodables.

La géométrie incertaine des limites d'altération constitue une difficulté pour les travaux, en particulier pour les fondations et les ouvrages en déblai. La sismique-réfraction est utilisée, dans ces roches comme dans d'autres terrains, pour préciser le profil d'altération. Noter que, dans les micaschistes, la vitesse des ondes dépend de l'orientation. Exemple d'un échantillon d'ardoise, où la vitesse des ondes longitudinales VP est de 6 300 m/s parallèlement à la schistosité et de 4 500 m/s orthogonalement.

Pour la réalisation de talus dans les micaschistes, on s'attachera à considérer :

- une pente 2/3 dans la partie supérieure très altérée ;
- la présence de phénomènes de fauchage si le pendage est rentrant fort, d'autant plus facilement qu'un début d'altération s'est développé ;
- l'altérabilité de la roche qui peut engendrer des dégradations différentielles. C'est notamment le cas des filons quartzeux ou granitiques à grain fin qui résistent bien plus à l'altération que le micaschiste encaissant.

2.3 ROCHES VOLCANIQUES

Les basaltes sont des roches volcaniques noires formées à partir de laves très fluides et se présentant sous formes de coulées prismées, cordées (Photographie 19) voire de coussins lorsque qu'elles apparaissent sous l'eau. Ils sont constitués d'une « pâte » noire dans laquelle des cristaux visibles à l'œil nu sont parfois présents.
Les cristaux visibles sont principalement composés de feldspaths plagioclases blancs et de pyroxènes noirs à vert sombre (qui donnent sa couleur sombre à la roche), ainsi que des olivines vert-jaune. La pâte comprend des cristaux microscopiques et du verre de la même nature en plus d'oxydes de fer et de titane. Le verre correspond à la forme non cristalline de la lave brusquement refroidie.

Photographie 19 : coulée de basalte, Islande ©JL Durville

Lors de leur altération, les minéraux du basalte (olivine, plagioclases, pyroxène) évoluent vers des minéraux de type zéolites, chlorites, smectite, goethite, carbonates qui donnent, après dissolution et précipitation, des oxydes et hydroxydes associés (fer et alumino hydroxydes, goethite, …).

De manière illustrée, l'altération **météorique** pénètre dans le massif rocheux basaltique au droit des discontinuités, à l'échelle macroscopique, et elle pénètre les cristaux d'abord de manière périphérique puis générale à l'échelle microscopique pour générer de nouveaux minéraux d'altération.

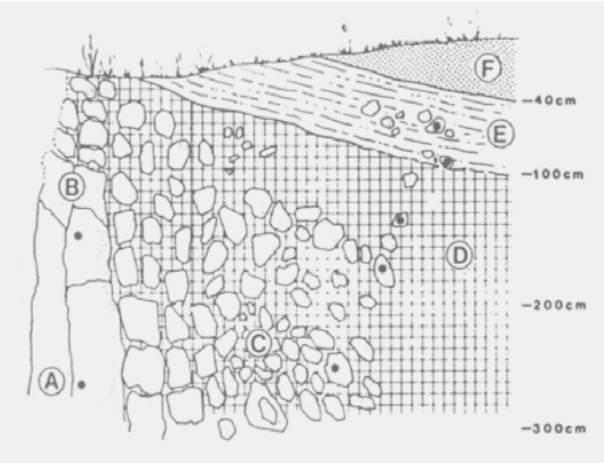


Figure 9 : Coupe en carrière de basalte (Aurillac) :
A basalte en prisme, B basalte fracturé, C basalte en boules, D Argile-limoneuse rouge, D argile limoneuse noire.

Comme l'altération des basaltes est sensible aux gradients de température et de pression, l'altération **hydrothermale** se révèle beaucoup plus intense que l'altération de surface. Cette intensité se traduit par des produits d'altération différents de l'altération météorique, formant ainsi une signature de l'altération vécue par le basalte.

Un mode d'altération particulier est l'altération en sonnenbrand (sunburn = brûlures de soleil), qui réduit les basanites en gravillons sous l'action du rayonnement solaire (Photographie 20).

Photographie 20 : altération en sonnenbrand du basalte du Mézenc ©JL Durville

Dans un horizon basaltique relativement homogène (à l'intérieur d'une coulée), l'ordre de grandeur de la séquence d'altération est métrique au niveau de la matrice et des discontinuités en fonction de leur degré d'ouverture. Le toit du rocher sain est a priori chahuté, en fonction des coulées le formant, leurs natures minéralogiques et les discontinuités pouvant l'affecter. Ainsi, des horizons altérés peuvent être retrouvés sous un toit de rocher sain si une coulée a commencé son altération avant d'être recouverte par une suivante.

L'altérabilité de ces terrains est importante et se manifeste à l'échelle de la vie humaine.

A l'échelle du massif basaltique, les intercoulées (paléosols, paléothalwegs, scories et cinérites) peuvent considérablement perturber le profil d'altération de l'intérieur de coulée tel que présenté ci-dessous.

Photographie 21 : Carottes de basaltes à zéolites faiblement altéré jusqu'à décomposé (Cilaos, 2022) ©J. Kasperski

III

COMMENT CARACTÉRISER L'ALTÉRATION ?

3. COMMENT CARACTÉRISER L'ALTÉRATION ?

Il n'existe pas d'essai universel ou de méthode unique pour caractériser l'altération d'un massif rocheux, et seul un faisceau de mesures combinées et d'observations à différentes échelles peut aider à construire le modèle géologique intégrant l'altération.

L'**altération de la matrice** rocheuse et des discontinuités se caractérise, à petite échelle, par des **observations visuelles**, sur échantillons prélevés par carottage ou sur imagerie de paroi et par une identification des phases cristallines par examen au microscope de **lames minces** issues d'échantillons judicieusement choisis dans les caisses de carottes. L'examen en lame mince demeure la seule méthode pour détecter les microstructures et les minéraux qui ne s'observent pas à l'œil nu, par exemple la présence de minéraux évolutifs ou agressifs. Parfois, des **diagraphies différées** en sondage peuvent également apporter des informations précieuses, par exemple en renseignant sur l'argilosité.

Ces éléments permettent de définir la nature et la hauteur de la séquence d'altération.

L'altération affectant les propriétés physiques et mécaniques, les **essais en laboratoire** peuvent être indirectement valorisés, même s'il faut rester toujours très prudent sur l'interprétation des résultats, qui peuvent également être perturbés par l'anisotropie, la microfissuration ou les dimensions des échantillons. On mentionnera toutefois l'essai de valeur au bleu, très efficace pour mesurer la teneur en argiles d'altération d'un échantillon.

L'**altération de la masse rocheuse** peut être indirectement approchée par les **mesures géophysiques**, intégratrices, telles que la sismique réfraction (accès au champ de vitesses des ondes sous réserve d'absence d'inversion), les méthodes électriques (accès au champ de résistivité) ou électro-magnétiques. Les méthodes géophysiques (notamment la sismique réflexion) permettent aussi, en théorie, d'imager le toit du substratum sain, sous des conditions d'un contraste marqué et d'une géométrie d'interface relativement simple, ce qui est rarement le cas dans une séquence d'altération.

Comme toute mesure indirecte, prudence et humilité doivent guider l'interprétation des méthodes géophysiques. Il est impératif de croiser les méthodes géophysiques et de les étalonner avec des sondages. Ces précautions prises, les méthodes géophysiques demeurent le seul moyen d'extrapoler raisonnablement les données de sondage et d'ainsi caractériser la variabilité spatiale.

Les **essais géotechniques in situ** permettent utilement de caractériser les variations de résistance (en général croissante avec la profondeur) ou de déformabilité (en général décroissante avec la profondeur). Ils peuvent toutefois se heurter à des refus prématurés, laissant croire à l'atteinte du substratum sain alors que le sondage se heurte simplement à un fantôme de roche mère piégé dans la séquence d'altération. En outre, comme pour les essais en laboratoire, les valeurs mécaniques peuvent être affectées par d'autres phénomènes (fracturation et/ou décompression) et il est audacieux de vouloir caractériser une séquence d'altération et la délimiter par ces seuls essais géotechniques.

Il existe plusieurs classifications des profils d'altération dans la littérature scientifique. Il est seulement rappelé ci-dessous celle de l'AFTES, issue du GT 1 qui permet une bonne description pour la géologie de l'ingénieur, ainsi que celle de Thierry & al.

Classes AFTES	Termes descriptifs du degré d'altération du massif rocheux
AM1a	**Rocher sain**
AM1b	**Rocher faiblement altéré** Altération limitée aux surfaces de discontinuités principales ; rocher sain dans la masse
AM2	**Rocher légèrement altéré** Altération faible dans la masse rocheuse mais bien développée sur les discontinuités
AM3	**Rocher modérément altéré** Altération bien visible dans toute la masse rocheuse mais matériau non friable
AM4	**Rocher très altéré** Forte altération dans toute la masse rocheuse
AM5	**Rocher complétement altéré** La texture et les fissures importantes sont toujours visibles
AM6	**Rocher complétement décomposé** Texture et fissuration reconnaissables Sol résiduel - Pas de remaniement

Tableau 1 : classification AFTES de l'altération des massifs rocheux.

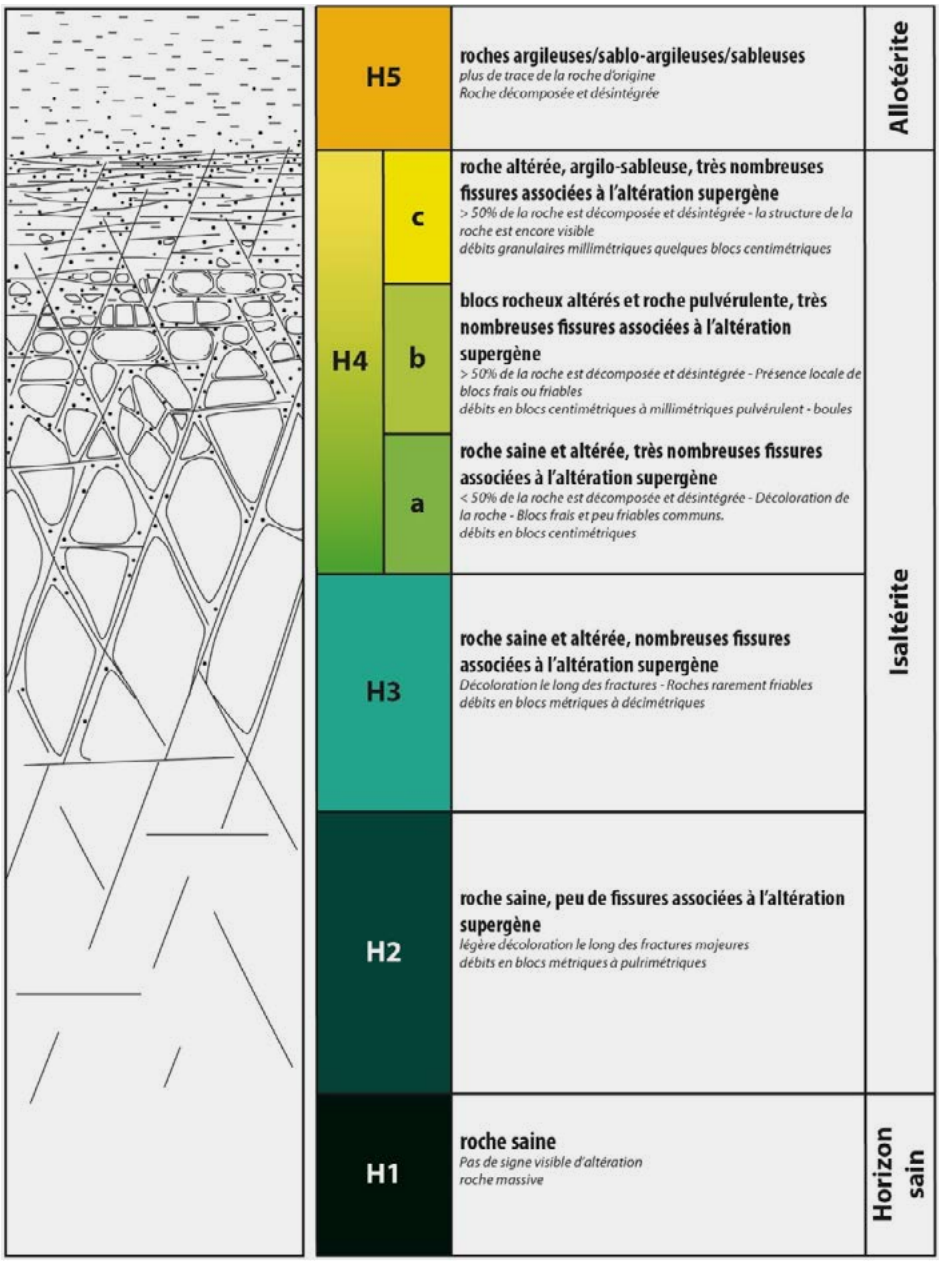


Figure 10 : Profil d'altération, Thiery et al., 2019

IV

QUELQUES RÉFÉRENCES POUR ALLER PLUS LOIN

4. QUELQUES RÉFÉRENCES POUR ALLER PLUS LOIN

- AFTES (2003) Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains – GT1R1F1.
- BRGM, Cerema (2023). Guide méthodologique Aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté.
- Campy, M., Macaire J-J. (1989). Géologie de la surface. Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux. Dunod, 435 p.
- CFGI (2018) Géologie de l'ingénieur : actualité et perspectives, Paris: Presses des Mines, collection Sciences de la Terre et de l'environnement.
- Curtil S., Legrand P. (2008). LGV Rhin-Rhône : intégration du risque karstique dans la conception des fondations du viaduc du Pertuis. JNGG, Nantes, p. 669-676.
- Darcy P. (1979). Géologie et génie civil des ouvrages souterrains sous la chaîne du Chat et de l'Epine (Savoie). Revue française de géotechnique n°6, p. 51-63.
- Delerce S. « De la réactivité des basaltes altérés et ses conséquences pour la minéralisation naturelle et industrielle du carbone », thèse de doctorat soutenue le 07-02-2023 à Toulouse 3.
- Ildefonse P. Altérations prémétéorique et météorique des olivines du basalte de Belbex (Cantal, France). In: Pétrologie des altérations et des sols. Vol. II : Pétrologie des séquences naturelles. Colloque international du CNRS, Paris 4-7 juillet 1983. Strasbourg : Institut de Géologie – Université Louis-Pasteur, 1983. pp. 69-79. (Sciences Géologiques. Mémoire, 72).
- Foucault et J.-F. Raoult Dictionnaire de géologie.
- Guilloux A. (2013). Le viaduc de Millau. In Manuel de Mécanique des Roches (P. Duffaut coord.), t. IV, p. 433-450.
- Lorain J.-M. (1973). Le Calcaire de Beauce : géologie, hydrogéologie, applications en construction routière et génie civil. Édité par le laboratoire Central des ponts et Chaussées. 224 p.
- Noury G., Perrin J., Gourdier S. (2018). Rôle des intempéries dans les mouvements de terrain liés aux cavités : retour sur la crise «Loiret» de juin 2016. JNGG, Champs-sur-Marne.
- Price D.G. (1993) A suggested method for the classification of rock mass weathering by rating system, Quarterly journal of engineering geology, 26, pp 69-76.
- Price DG (1995) Weathering and weathering processes. Quarterly Journal of Engineering Geology 28, Pages 243-252.
- Toulemont M. (1987). Les gypses lutétiens du bassin de Paris - Sédimentation, karstification et conséquences géotechniques. Rapport des laboratoires des Ponts et chaussées GT 24, 318 p.
- Thiery Y., Lacquement F. and Marçot N., 2019, Landslides triggered in weathered crystalline rocks of moderate latitudes: A case study in Mediterranean environment (The Maures Massif, France), Engineering Geology, Volume 248, 8 January 2019, Pages 164-184.
- Working Group (1995), the description and classification of weathered rocks for engineering purposes, Quarterly journal of engineering geology, 28, Pages 207-242.
- 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 R 40191, 18 p., 9 fig., 4 pl. hors-texte.

Site de Geologyscience :
https://fr.geologyscience.com/rocks-2-2/igneous-rocks/

CFGI

COMITÉ FRANÇAIS DE
GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR
ET DE L'ENVIRONNEMENT

Responsable de publication :

CFGI (Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement)

Site internet : www.cfgi-geologie.fr

Comité de rédaction :

M. Brisebarre, R. Cojean, J.L. Durville, J.A. Fleurisson, A. Quenez, J. Kasperski,
sous la coordination de G. Deveze

Copyright :

© **CFGI,** Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement.
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement
ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit,
sans l'autorisation de l'Editeur, à savoir, le CFGI.

Graphisme et mise en page :

Valérie SCOTTO DI CÉSARÉ (Studio Graphique VSDCom)

Date de publication :

Févier 2025

CFGI

COMITÉ FRANÇAIS DE
GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR
ET DE L'ENVIRONNEMENT

Revue
Française de
Géotechnique

IAEG
AIGI
ENGEOL

www.cfgi-geologie.fr

PUBLICATION JANVIER

2025