

Les altérites : l'épiderme de la Terre.

Caroline Ricordel-Prognon, Médard Thiry, Florence Quesnel

▶ **To cite this version:**

Caroline Ricordel-Prognon, Médard Thiry, Florence Quesnel. Les altérites : l'épiderme de la Terre.. Géosciences, 2009, 9, pp.56-63. hal-00741869

HAL Id: hal-00741869
https://brgm.hal.science/hal-00741869

Submitted on 9 Nov 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Les altérites : l'épiderme de la Terre

Les phénomènes d'altération supergène (météoriques) comptent parmi les processus les plus importants qui modifient la surface de notre planète. Les altérations sont le résultat des interactions entre géosphère, biosphère, hydrosphère et atmosphère.

Profil d'altération « Sidérolithique » d'âge Crétacé inférieur (cirque des Mottes à Boudes, Puy de Dôme, France)

A "Siderolithic" weathering profile from the Early Cretaceous (Mottes' cirque, near Boudes, Puy-de-Dôme, France).

© M. Thiry



Dr Caroline Ricordel-Prognon
Ingénieur géologue
BRGM, Unité Régolithe et Réservoirs
c.prognon@brgm.fr

Dr Florence Quesnel
Ingénieur géologue
BRGM, Unité Régolithe et Réservoirs
f.quesnel@brgm.fr

Dr Médard Thiry
Maître de recherche – Mines ParisTech
Centre de Géosciences
medard.thiry@mines-paristech.fr

Les roches des surfaces continentales subissent des altérations qui sont des « usines » chimiques aux réactions lentes mais continues, à production massique gigantesque sur la durée. En agriculture, les altérations contrôlent le développement et l'érosion des sols ainsi que leur productivité. En géotechnique, la répartition et les propriétés physiques des profils d'altération conditionnent l'aménagement des territoires. Dans le domaine de la gestion des risques naturels, l'infiltration des eaux et les ruissellements dépendent des altérites et de leur couvert végétal. Les réserves aquifères sont fréquemment liées à des altérites. Ainsi, sur les socles cristallins, les aquifères majeurs sont associés aux paléoaltérations et dans les régions calcaires, les karsts issus de l'altération conditionnent la quantité et la qualité des ressources en eau. Enfin, la richesse et la répartition de nombreuses ressources minérales résultent d'anciennes altérations.

Pour mieux appréhender le futur de notre planète, il est nécessaire de comprendre les phénomènes d'altération et leur évolution dans le temps, d'en définir les propriétés et le comportement face aux sollicitations naturelles et anthropiques. Les altérations actuelles permettent d'étudier leur fonctionnement en rapport avec le climat et les paysages, alors que les altérations anciennes fournissent en plus la dimension temps,

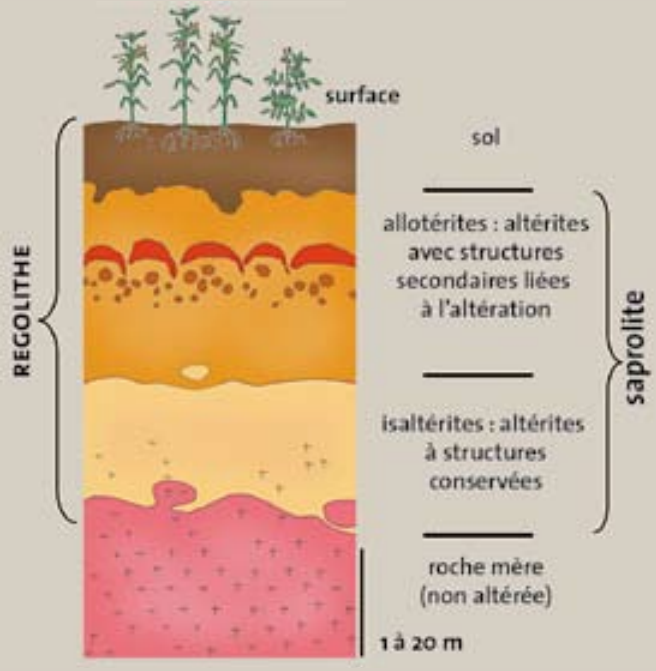


Fig. 1 : Profil d'altération : caractères généraux et définitions. Modifié d'après Schmitt, 1999.

Fig. 1: A weathering profile: general characteristics and definitions. Modified from Schmitt, 1999.



Structures secondaires liées aux écoulements dans un profil d'altération sidérolithique. Coiffes et raies d'illuviation au-dessus de nodules. Ces structures sont caractéristiques de processus pédologiques. Les coiffes sont constituées de matériaux fins silto-argileux entrainés par les eaux de percolation et qui se déposent au-dessus des nodules déjà indurés, dans les zones de ralentissement des écoulements. Profil sidérolithique, coupe Le Bouchet, Olby (Puy-de-Dôme), Massif Central.

Secondary structures associated with seepage in a siderolithic weathering profile. Illuviation capping and streaks laid down atop nodules. Such structures are typical of pedological processes. The capping is composed of fine silty clay materials borne by percolation water and are deposited over nodules that are already indurated in zones where seepage has slowed. The siderolithic profile cross-section at Le Bouchet, Olby (Puy-de-Dôme Department), in the Massif Central

© M. Thiry, Mines ParisTech

donc la vitesse des phénomènes. Ainsi, les altérations développées au cours des temps géologiques représentent un des systèmes d'observation privilégiés d'une Terre dynamique.

Nature des altérites

Les **altérations supergènes** (ou météoriques) correspondent aux transformations physiques et chimiques subies par les roches au contact de l'atmosphère et de l'hydrosphère. Les **altérites** sont les matériaux issus de l'altération. Les **paléoaltérations** sont d'anciennes altérations qui ne sont plus fonctionnelles et qui ont éventuellement été enfouies sous des dépôts sédimentaires. L'altération progresse *per descensum* de la surface vers la profondeur. S'individualisent ainsi des horizons à caractères pétrophysiques et géochimiques spécifiques qui forment le **profil d'altération** *(figure 1)*. Le sol est la partie superficielle des profils dans laquelle les actions biologiques sont prépondérantes. Souvent on parle de **régolithe** pour caractériser l'ensemble des roches généralement meubles et non consolidées que l'on trouve en surface ou au-dessus de la roche mère. Le régolithe englobe aussi les formations superficielles d'origine sédimentaire (formations alluviales, éoliennes, glaciaires...).

L'altération physique conduit à la fragmentation de la roche par la décompression en surface, les cycles thermiques et hygrométriques, l'action du gel (cryoclastie), les forces de cristallisation et les bioturbations (micro-organismes, végétaux supérieurs, animaux...). L'altération chimique correspond aux transformations chimiques et minéralogiques que la roche subit au contact de l'atmosphère et de l'hydrosphère. En effet, la plupart des roches présentent un caractère basique (dû aux silicates et/ou aux carbonates présents) et/ou un caractère réducteur (dû à la matière organique, au fer divalent et au soufre réduit). Or, l'eau de pluie (eau météorique) a un caractère oxydant et acide acquis au contact de l'atmosphère. C'est le déséquilibre entre l'eau acide et oxydante avec les roches basiques et/ou réductrices qui est à l'origine de l'altération chimique.

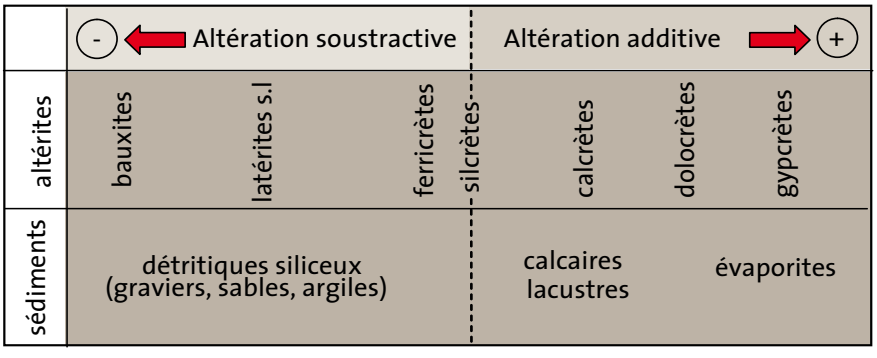
Schématiquement, les altérations supergènes se distribuent selon une série allant d'un pôle soustractif (exportation de matière) à un pôle additif (importation nette de matière) *(figure 2)*. Ces deux grands types d'altérites peuvent comporter des phases intermédiaires, reflétant l'évolution des processus ayant opéré, dans des conditions physico-chimiques successives parfois fort différentes.

Fig. 2 : Classification des altérites. L'ensemble des altérations supergènes se distribue selon une série continue allant d'un pôle soustractif à un pôle additif ; les silcrètes, selon leur type, se situent dans l'un ou l'autre des deux domaines. La nature des sédiments transitant ou se déposant sur la surface continentale pendant la formation des profils d'altération est en équilibre avec la nature des altérites développées.

Modifiée d'après Wyns, 2001.

Fig. 2: Classification of alterites. All supergene alterites are distributed according to a continuous series ranging from a subtractive extreme to an additive one. Silcretes, depending on their type, may fall into one or the other of these two categories. The nature of sediments transiting across or deposited on the surface of the continent when the weathering profiles are forming is in balance with the nature of the alterites that develop.

Modified from Wyns, 2001.



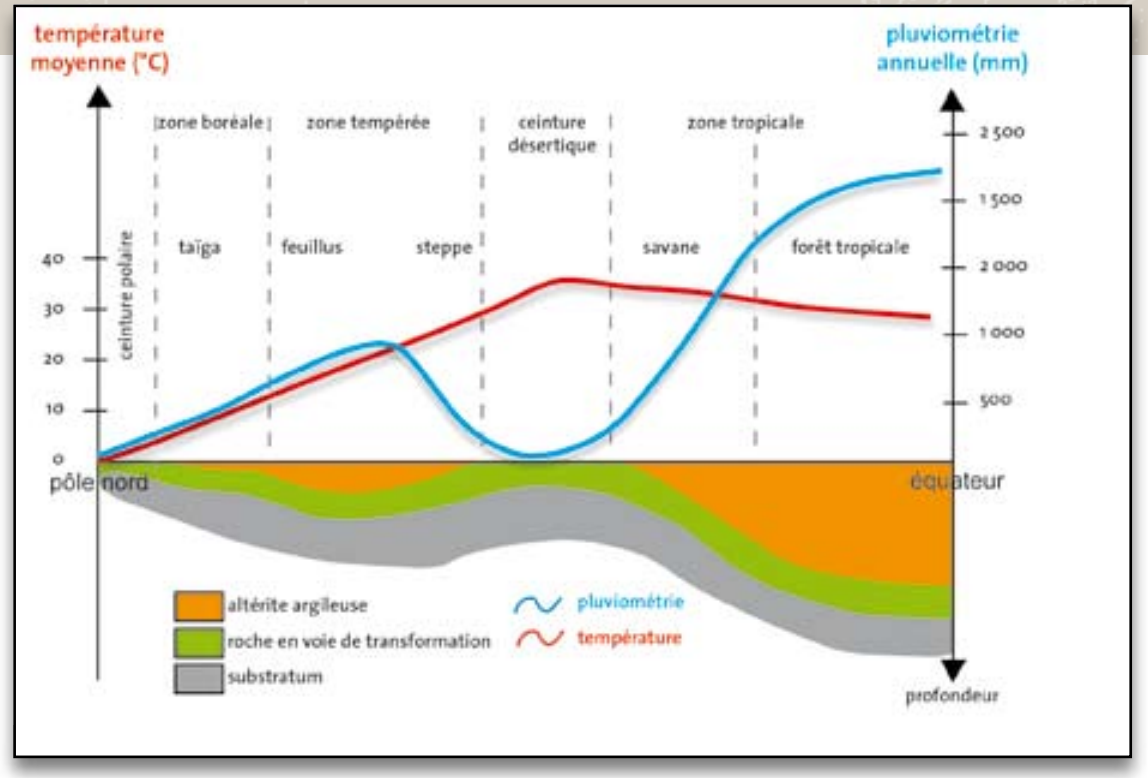


Fig. 3 : Zonalité climatique actuelle de l'altération en fonction de la latitude.
Modifiée d'après Strakhov, 1967.
Fig. 3: Present-day climate zoning for weathering versus latitude.
Modified from Strakhov, 1967.

Genèse et évolution des altérites

La formation et l'évolution des altérites sont gouvernées par quatre paramètres principaux : la nature de la roche mère et des minéraux qui la composent, le contexte climatique, la position topographique dans le paysage et les conditions tectoniques.

Tous les minéraux d'une **roche mère** ne présentent pas la même stabilité vis-à-vis de l'altération météorique. Ainsi, les roches « basiques » tels les basaltes mais aussi les calcaires, sont plus altérables que les granites et les grès. La texture et la structure de la roche mère, interviennent aussi. Ainsi, les roches poreuses (grès *s.l.*), qui permettent la circulation de l'eau d'infiltration, sont plus vulnérables que les roches massives (granite par exemple).

Le **climat** est l'un des acteurs majeurs de l'altération surpergène. L'eau météorique est le réactif et la température intervient sur la vitesse des réactions. Actuellement il existe une zonalité latitudinale de l'altération en fonction de ces paramètres *(figure 3)*. Le développement des altérations a été inégal au cours de l'histoire géologique. Les modifications de la **composition de l'atmosphère**, et notamment sa teneur en CO_2, interviennent sur la composition de l'eau de pluie (plus acide quand la teneur en CO_2 est plus forte) et sur la température [Schmitt (1999)]. Ces modifications ont augmenté les taux d'altération à certaines périodes géologiques (au Crétacé par exemple).

« Le climat est l'un des acteurs majeurs de l'altération surpergène. »

La **géomorphologie** des paysages participe également aux processus d'altération car pour qu'un profil d'altération se forme, il faut que l'eau percole de la surface vers la profondeur. Une différence d'altitude doit exister entre des zones hautes et basses pour permettre la circulation de l'eau de pluie. Différents profils forment souvent une toposéquence étagée le long des reliefs, avec des profils lessivés à l'amont et moins lessivés ou confinés à l'aval. L'altération engendrant un départ de matière sous forme d'éléments chimiques dissous, la surface topographique finit inexorablement par s'abaisser et les matériaux exportés depuis les parties hautes des profils et des paysages vont tendre à colmater les bas fonds topographiques. Les profils différenciés influencent l'érosion et le modelé des paysages. Ainsi se différencient, dans les paysages tropicaux, des morphologies en demi-orange sous climat tropical humide et forêt dense et des morphologies en grand glacis et inselbergs sous climat tropical sec avec couvert végétal discontinu de savane.

Enfin, la **tectonique** joue un rôle important sur l'altération. Un antagonisme marqué existe entre altération

chimique et tectonique active. En effet, les altérites étant la plupart du temps des matériaux meubles, leur conservation dans les paysages, et *a fortiori* dans l'enregistrement géologique, nécessite une certaine stabilité tectonique. Lorsque les taux de soulèvements sont importants, l'altération chimique n'a pas le temps de se mettre en place, les profils d'altération ne se développent pas, ou peu, et sont très rapidement tronqués, l'érosion physique étant le processus dominant. Au contraire, lors des périodes de stabilité tectonique, d'épais profils vont pouvoir se développer et être conservés. Ils seront d'autant plus matures et profonds que la stabilité durera et seront entretenus s'il y a un lent soulèvement de la topographie. S'il y a subsidence, la surface topographique s'abaissera et les profils seront alors scellés par des sédiments continentaux, puis parfois marins. Fossilisés, ils cesseront de se développer, leur couverture les protègera jusqu'à une exhumation ultérieure.

Les facteurs les plus favorables à la genèse et à l'entretien des profils d'altération sont donc : une roche poreuse/fissurée et riche en minéraux faciles à altérer, un climat chaud, humide et riche en CO_2, un paysage assez différencié, des conditions tectoniques stables ou en faible soulèvement. Le temps et la topographie sont toutefois les paramètres majeurs qui contrôlent l'évolution des altérites.

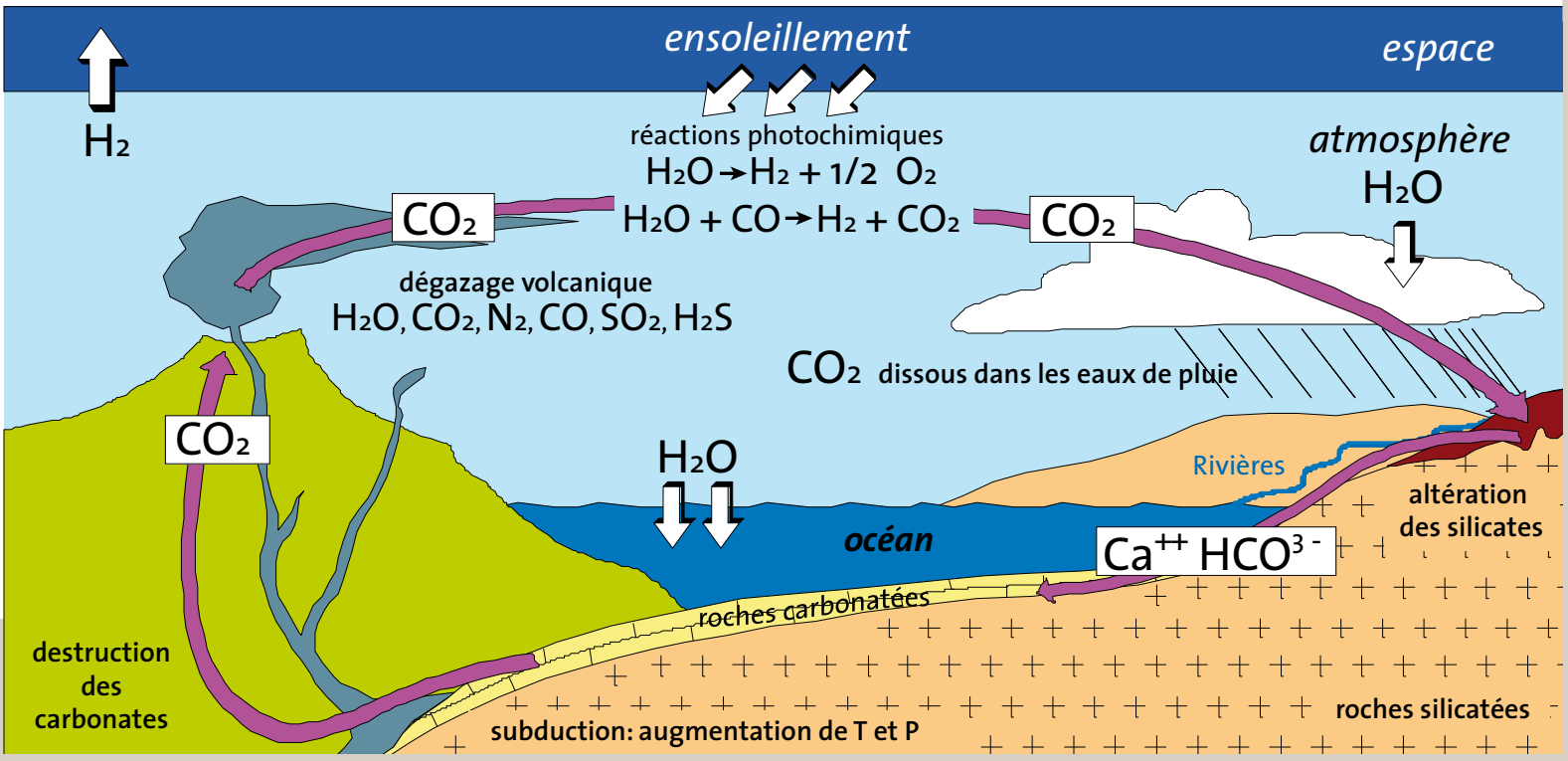
« Le temps et la topographie sont d'autres paramètres majeurs qui contrôlent l'évolution des altérites. »

Une usine géochimique à l'échelle planétaire

Les altérites fonctionnent comme une interface d'échange avec l'atmosphère et participent aux changements et/ou la régulation de l'atmosphère terrestre. L'altération agit ainsi sur la planète Terre depuis sa naissance au sein du système solaire et joue un rôle important dans le cycle du carbone *(figure 4)*. L'altération des minéraux par hydrolyse nécessite des ions H^+ qui proviennent le plus souvent de consommation du CO_2 et aboutissent à la transformation des silicates calciques et magnésiens en carbonates. Ainsi, les teneurs en CO_2 de l'atmosphère n'ont cessé de baisser de façon importante depuis le Protérozoïque, par formation de carbonates et leur enfouissement. Le moteur de cette évolution est l'altération des silicates du manteau.

L'évolution de la teneur en CO_2 de l'atmosphère au cours des temps géologiques (avec des teneurs d'environ 20 fois les teneurs actuelles au Cambrien, il y a 500 Ma) est marquée par de nombreuses inflexions

Fig. 4 : Schéma illustrant les sources et puits de CO_2 : principaux contrôles de la chimie de l'atmosphère, incluant le cycle carbonates-silicates.
Modifié d'après Schmitt, 1999.
Fig. 4: Diagram illustrating CO_2 sources and sinks: The main factors controlling atmospheric chemistry, including the carbonate-silicate cycle.
Modified from Schmitt, 1999.



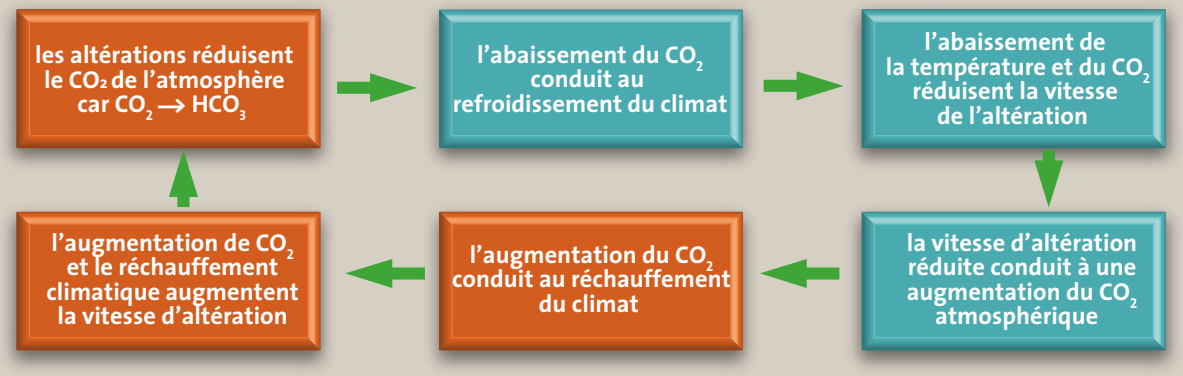


Fig. 5 : Rétroactions des altérations des silicates sur les changements climatiques induits par la variation du CO_2 atmosphérique.

Fig. 5: Retroactions of silicate alterations on climate changes caused by variations in atmospheric CO_2.

© BRGM, Mines ParisTech

et accroissements qui s'expliquent en grande partie par des régulations dues aux altérations [Berner et Caldeira (1997)]. Quand la teneur en CO_2 de l'atmosphère est élevée, l'altération est amplifiée par l'acidité de l'eau de pluie et l'élévation de température. L'altération consomme alors du CO_2 lors de la carbonatation des silicates, les teneurs en CO_2 diminuent et le climat se refroidit. L'altération ralentit et les teneurs en CO_2 atmosphérique augmentent à nouveau *(figure 5)*. Ainsi, les altérations jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat de la Terre sur les grandes périodes de temps.

« Le temps met tout en lumière » *(Thalès)*

De nombreuses paléoaltérations sont localisées autour de la ceinture tropicale et équatoriale actuelle sur les zones stables des vieux cratons : Afrique-Amérique du Sud, Asie-Australie *(figure 6d)*. Cependant, d'importants paléoprofils d'altération existent également dans les zones de bassin, principalement sur les bordures, et jusqu'à des latitudes très élevées. Ces profils se sont formés dans des contextes climatiques différents de la répartition actuelle des ceintures climatiques, pendant les périodes de stabilité tectonique et/ou de bas niveau. Ces profils ont cessé de fonctionner quand le niveau de base relatif est remonté, ou quand la subsidence a repris. La nature de ces paléoaltérations est très variable : épais profils kaoliniques, latéritiques, cuirasses ferrugineuses, bauxitiques, siliceuses, calcrètes, etc. *(figure 6)*.

La datation des altérations et paléoaltérations a été pendant longtemps la pierre d'achoppement pour quantifier la durée des processus et appréhender les dynamiques de la morphogenèse continentale. Les altérations et paléoaltérations sont souvent dépourvues de fossiles et les méthodes habituelles de la stratigraphie s'y appliquent difficilement.

« Les roches des surfaces continentales subissent des altérations qui sont des « usines » chimiques aux réactions lentes mais continues. »

Fig. 6 :
a) Résidus à silex (en brun-rouge) formés aux dépens des craies à silex (roche blanche) du bassin de Paris (près d'Amiens, France)
b) Silcrète pédologique couronnant un profil d'altération très évolué à la Croix des Landelles (Bretagne, France)
c) Profil d'altération ferrugineuse de la limite Paléocène-Eocène (Carrière de Grandglise, Belgique)
d) Isoaltérite de roches gréso-pelitiques, avec kaolinisation et blanchiment suivis par une ferruginisation le long des discontinuités lithologiques et des fractures (Crampians, Victoria, Australie)
e) Latérite bauxitique rouge développée sur une coulée basaltique et fossilisée par de nouvelles coulées de basalte (Plateau d'Antrim, Irlande du Nord)
f) Paléoaltérite à silex au dessus de la craie (roche blanche) couverte par une coulée de basalte (roche noire) (Devlin's quarry, Plateau d'Antrim, Irlande du Nord).

Fig. 6:
a) Clay-with-flints (reddish brown) formed upon the flint-bearing Chalk (white rock) of the Paris Basin (near Amiens, France)
b) Pedologic silcrete capping a highly evolved weathering profile at Croix-des-Landelles (Brittany, France)
c) Ferruginous weathering profile at the Paleocene-Eocene boundary (Grandglise quarry, Belgium)
d) Isoalterite of greso-pelitic rocks, with kaolinization and whitening, followed by ferruginization along the lithologic discontinuities and fractures (Crampians, Victoria, Australia)
e) Red bauxitic laterite developed on a basaltic flow and fossilized by subsequent basalt flows (Antrim Plateau, Northern Ireland)
f) Paleo-Clay-with-flints overlying chalk (white rock), covered by a basaltic flow (black rock) (Devlin's quarry, Antrim Plateau, Northern Ireland).

© a-b-c-e-f) F. Quesnel, BRGM, d) M. Thiry, Mines ParisTech.


a
1 m
b
c
d
1 m
e
f

► Datation par paléomagnétisme des paléoaltérations ferrugineuses

Au cours de l'altération, la plupart des minéraux primaires sont dissous et des oxydes secondaires précipitent. La goethite et l'hématite, principaux oxydes de fer, se forment dans les profils d'altération et acquièrent alors une aimantation chimique rémanente, dans la direction du champ géomagnétique ambiant. Cette direction permet de calculer la position du pôle paléomagnétique attaché au site où les minéraux magnétiques ont précipité. La datation par paléomagnétisme s'obtient en comparant le pôle paléomagnétique d'un site à la courbe de dérive apparente du pôle du continent sur lequel ce site est situé *(figure 7)*.

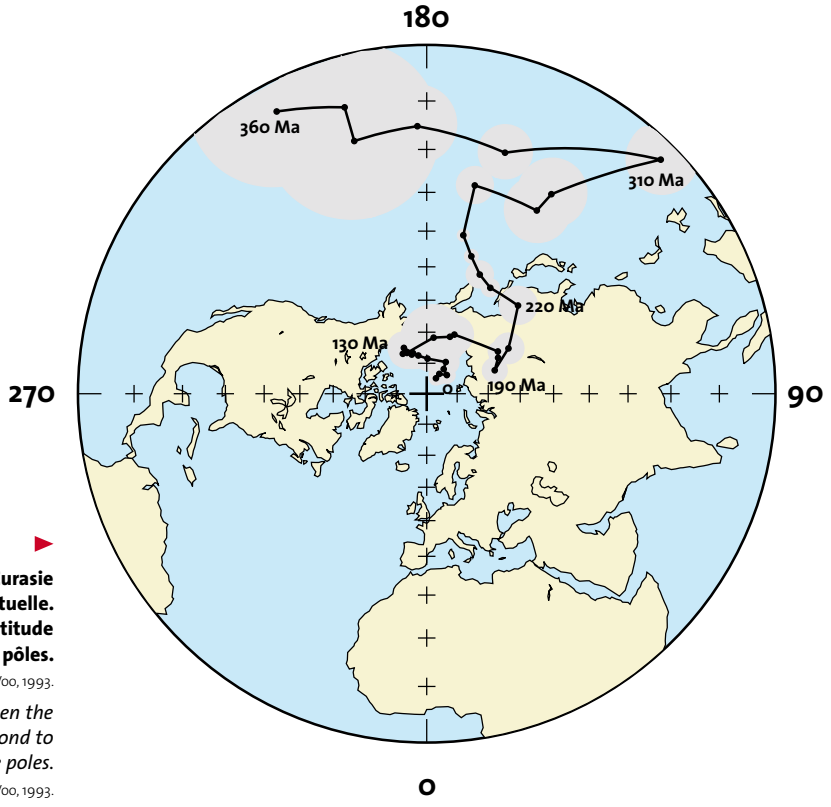


Fig. 7 : Courbe de dérive apparente du pôle de l'Eurasie depuis le Carbonifère jusqu'à sa position actuelle. Les cercles gris correspondent à l'incertitude sur la position des pôles.

D'après Besse et Courtillot, 1991, et Van der Voo, 1993.

Fig. 7: Apparent polar wander path of Eurasia between the Carboniferous and today. The grey circles correspond to uncertainties on the position of the poles.

From Besse et Courtillot, 1991, and Van der Voo, 1993.

Plusieurs méthodes physico-chimiques ont été appliquées ces dernières décennies pour dater les paléoaltérations. La radiochronologie peut être appliquée à des minéraux néoformés et spécifiques [Vasconcelos *et al.* (1994)]. La variation des rapports entre certains isotopes stables dans le temps peut être mise en œuvre comme en chemostratigraphie. Les rapports isotopiques de l'oxygène et du deutérium peuvent être utilisés en les rapportant à la latitude [Bird et Chivas (1988)]. Le paléomagnétisme appliqué aux oxydes de fer permet de dater les paléoaltérations ferrugineuses *(cf. encadré)*.

Les datations obtenues ces dernières décennies sur les profonds profils d'altérations des vieux cratons, tout comme celles obtenues dans les bassins sédimentaires ont amené à revoir certains concepts de base. Ainsi, la datation des profils sur les vieux cratons africains et sud-américains [Vasconcelos *et al.* (1994) ; Théveniaut & Freyssinet (2002)] a montré l'ancienneté de certaines de ces altérations, dont le sommet des profils peut remonter à près de 100 Ma ! De manière similaire, la datation à 140 Ma de certains paléoprofils d'altération du Massif central, qui étaient généralement rapportés à 40-35 Ma, oblige à repenser entièrement toute l'évolution paléotopographique du Massif central [Ricordel (2007)].

On constate que les altérites réparties autour de la planète sont pour la plupart très anciennes. L'inventaire ne fait que débuter, mais d'ores et déjà plusieurs périodes apparaissent plus favorables à l'altération météorique, comme le Crétacé inférieur, le Paléogène inférieur, le Miocène...

Les altérites : observatoire privilégié d'une Terre dynamique

De nombreuses questions restent en suspens. En particulier, les grandes paléoaltérations se développent-elles de manière régulière sur de longues périodes ou au contraire sont-elles « pulsées » par les crises climatiques et tectoniques ? Si oui, ces grandes phases d'altération pourraient être mises en parallèle avec l'enregistrement des bassins sédimentaires, avec retour sur les bilans de matière, la stratigraphie séquentielle... Pour le moment, nous n'en sommes qu'aux prémices dans ce domaine. L'acquisition de nombreuses données et la multiplication des zones d'études sont la clé de l'interprétation des paléoaltérations, systèmes d'observation privilégiés d'une Terre dynamique.

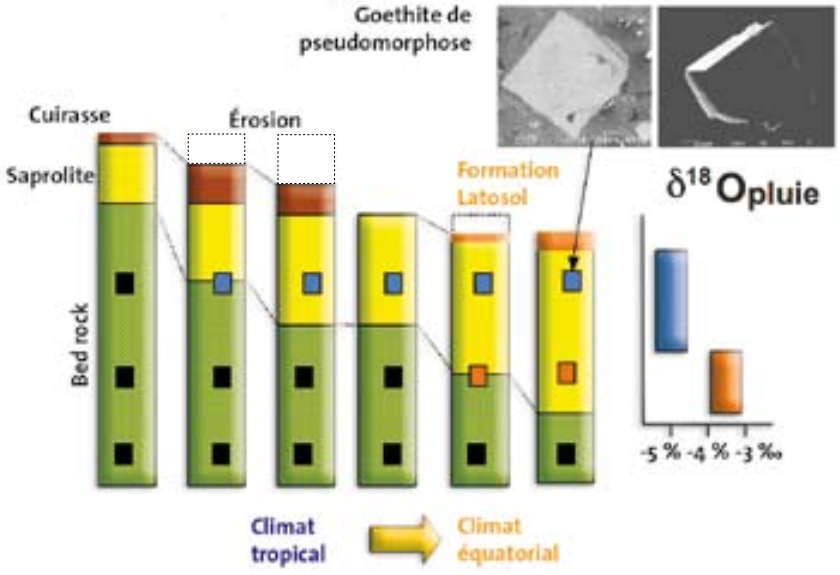
► Phénomène d'altération en Guyane : Yaou

Jean-Pierre Girard – TOTAL – DGEP/GSR/TG/ISS/Clas
jean-pierre.girard@total.com

Souvent épais et anciens, les régolithes des régions tropicales sont intéressants pour l'étude des phénomènes d'altération supergène et constituent de fantastiques enregistreurs des variations climatiques sur longues périodes. En Guyane française, les profils d'altération latéritiques formés il y a environ dix millions d'années ont enregistré un changement climatique important au Miocène terminal. La transition d'un climat tropical à alternance de saisons humide et sèche, à un climat tropical humide a différencié de nouvelles structures pédogéniques et de nouveaux minéraux dans lesquels le signal paléoclimatique a été gravé.

L'un des enregistrements les plus efficaces des changements climatiques est fourni par la composition isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène de minéraux comme la goethite, l'hématite ou la kaolinite.

À Yaou, en Guyane, le profil latéritique épais de plus de 30 m, montre un changement abrupt de la composition isotopique de goethites particulières (pseudomorphoses de pyrite) à 20 m de profondeur dans la saprolite inférieure. Ce changement marque le développement du climat équatorial humide actuel, responsable de la formation d'un latosol épais de plusieurs mètres. Les variations du climat sont ainsi enregistrées verticalement au sein des profils d'altération, en réponse au perpétuel rééquilibre avec les conditions climatiques locales. Par la suite, l'enregistrement peut être modifié à la faveur d'une superposition d'épisodes d'altération successifs. Ce peut être le cas notamment dans les horizons sommitaux indurés des latérites (« cuirasses ») qui cumulent souvent plusieurs phases d'altération intense. Le signal climatique originel y est néanmoins fossilisé dans les minéraux de grande résistance tels que les nodules d'hématite. Les évolutions climatiques anciennes restent ainsi gravées dans la couche altérée de la surface terrestre.



◄ **Évolution du profil latéritique de Yaou, Guyane, montrant l'enregistrement du passage d'un climat tropical à un climat équatorial dans le $\delta^{18}O$ des goethites de pseudomorphose.**

- **pyrite initiale**
- **pseudomorphose goethitique formée sous climat tropical**
- **pseudomorphose goethitique formée sous climat équatorial**

© Girard J.-P., Razanadradorosoa D. and Freyssinet P. (1997)

Alterites: Earth's outer skin

Supergene weathering features, developing over the course of geological times, are particularly interesting objects to study. Beyond their economic value, studying them provides information about paleoenvironments and the paleoecological conditions prevailing in the environments. The reactions involved when they form imply exchanges with the atmosphere and the hydrosphere, and they play a part in overall climate changes. They feed basins with soluble compounds and detrital materials. Examining them yields information about budgets of materials transferred from the continental realm to the marine realm. Therefore, understanding how they evolve over the scale of geologic times confers a new understanding of climate changes and the main geodynamic events.

Bibliographie : **Berner R.A., Caldeira K. (1997)** - The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle. Geology, 25, p. 955–956. **Besse J. & Courtillot V. (1991)** - Revised and synthetic apparent polar wander path for the African, Eurasian and North American and Inian plates and true polar wander since 200 Ma. Journal of Geophysical Research, 96, p. 4029-4050. **Bird M.I. & Chivas A.R. (1988)** - Oxygen-isotope dating of the Australian Regolith, Nature, 331 (6156), p. 513-516. **Ricordel C. (2007)** - Datations par paléomagnétisme des paléoaltérations du Massif central et de ses bordures : implications géodynamiques. Thèse Ecole Nat. Sup. Des Mines de Paris, Paris, 172 p. **Schmitt J.-M (1999)** - Weathering, rainwater and atmosphere chemistry: example and modelling of granite weathering in present conditions in a CO2-rich, and in an anoxic paleoatmosphere, Spec. Publs Int. Ass.Sediment., 27, p. 21-41. **Strakhov N.M. (1967)** - Principles of Lithogenesis, vol 1. Oliver and Boyd, Edinburgh. **Théveniaut H. & Freyssinet P. (2002)** - Timing of lateritization on the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic results from French Guiana and Surinam. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 178, 1, p. 91-117. **Van der Voo R. (1993)** – Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans, Cambridge University Press, 411 p. **Vasconcelos P.M., Brimhall G.H., Becker T.A. & Renne P.R. (1994)** - 40Ar/39Ar analysis of supergene jarosite and alunite: implications to paleoweathering history of western USA and West Africa, Geochimica et Cosmochimica Acta, 58, p. 401-420. **Wyns R. (2002)** - Climat, eustatisme, tectonique : quels contrôles pour l'altération continentale ? Exemple des séquences d'altérations cénozoïques en France, Bull. Inf. Geol. Bassin de Paris (39), 2, p. 5-16.