

Etude du développement de cortex d'altération sur des sédiments morainiques basaltiques post-Petit Age Glaciaire dans le sud de l'Islande

Samuel Etienne

▶ **To cite this version:**

Samuel Etienne. Etude du développement de cortex d'altération sur des sédiments morainiques basaltiques post-Petit Age Glaciaire dans le sud de l'Islande. Environnements périglaciaires, 2000, 25 (9), pp.25-39. halshs-00116863

HAL Id: halshs-00116863
https://shs.hal.science/halshs-00116863

Submitted on 28 Nov 2006

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.

Environnements périglaciaires, 2000

ETUDE DU DÉVELOPPEMENT DE CORTEX D'ALTÉRATION SUR DES SÉDIMENTS MORAINIQUES BASALTIQUES POST-PETIT AGE GLACIAIRE DANS LE SUD DE L'ISLANDE

Samuel ETIENNE

Université de Paris I Panthéon Sorbonne
CNRS GDR 49 « Recherches arctiques », UMR 8591 Meudon,
UPRES-A 6042 Clermont-Ferrand
mèl : nunatak@worldonline.fr

Introduction

Après avoir été déposés par les glaciers, les sédiments morainiques subissent une dégradation météorique plus ou moins lente, plus ou moins intense. Parmi les processus de destruction, l'altération biochimique peut jouer un rôle non négligeable, à côté voire antérieurement aux processus mieux reconnus et plus étudiés dans les milieux froids : gélifraction ou microgélifraction. Cette étude se propose de décrire certains des agents biologiques (micro-champignons) en action sur les surfaces détritiques au sud de l'Islande et de déterminer leurs effets sur les minéraux des roches basaltiques en comparant observations de terrain et expérimentations en laboratoire.

Quand bien même il serait démontré que les champignons ont des effets morphologiques certains, on ne saurait considérer les résultats de cette étude qu'en replaçant les éléments en question dans la chaîne météorique et en évaluant la dynamique de ces processus biogéniques face à celles des autres processus. Pour cela, nous avons essayé d'extraire des informations des cortex de météorisation se développant sur les sédiments basaltiques non enfouis : leurs caractéristiques micro-morphologiques nous renseignent sur leurs conditions de formation, alors que la mesure de l'épaisseur de ces cortex, corrélée à l'âge des dépôts, nous autorise à déduire des vitesses de développement. C'est en intégrant cet élément dans l'ensemble complexe des facteurs d'évolution des paysages volcaniques que nous pourrons apporter un premier élément de réponse à l'une des questions en

vogue actuellement dans la communauté périglaciaire : les processus biogéniques sont-ils une des clefs de l'évolution des micro-formes en milieu froid ?

Terrain d'étude

La vallée de la Jökulsá se situe au sud du Mýrdalsjökull, calotte glaciaire de 600 km² recouvrant la caldeira du Katla. Cette vallée qui entaille les trapps basaltico-hyaloclastitiques de Skógaheiði et Lambagil (voir Etienne 1999) est partiellement occupée par le Sólheimajökull, langue glaciaire d'une dizaine de kilomètres s'échappant de la calotte centrale. Ce glacier, particulièrement sensible aux variations climatiques ou aux migrations de ligne de partage des glaces, a connu des fluctuations incessantes tout au long de l'Holocène et, notamment, depuis sa large avancée du Petit Âge Glaciaire (1890), matérialisée aujourd'hui par une haute crête morainique située 1,5 km en aval du glacier (fig. 1). Le vingtième siècle a été marqué par un net recul des fronts glaciaires, même si, dans le détail, les positions n'ont cessé de varier : les photographies aériennes nous montrent que la position actuelle du front du Sólheimajökull est ainsi similaire à celle qu'il occupait en 1945, les moraines des années 60 et 70 étant aujourd'hui quelques centaines de mètres en amont et recouvertes par le glacier. Ainsi, les cordons morainiques qui sont l'objet de notre étude se placent entre la position de 1945 et celle de 1890, les dépôts ayant par conséquent un âge variant de 55 à 110 ans.



Figure 1 : Moraines, sandurs et épandages proglaciaires du Sólheimajökull (juin 1999).

1. Méthodologie

Mesure des cortex : corticométrie

Rappelons que les cortex de météorisation représentent la partie externe des sédiments, une enveloppe-interface entre la roche et l'atmosphère ; leurs caractéristiques morphologiques stigmatisent la métamorphose de la roche saine par l'action des processus d'altération. Ce sont donc des marqueurs essentiels des processus en activité, quelque soit le milieu étudié.

Après le travail pionnier de Cernohouz et Solc (1966), l'étude des cortex d'altération sur terrains glacigéniques a connu un fort regain d'intérêt dans les années quatre-vingt, faisant alors l'objet de nombreux travaux à des fins de datation notamment (Colman, 1982 ; Colman et Pierce, 1981 ; Whitehouse et Mc Saveney, 1983 ; Gellatly, 1984 ; Whitehouse *et al*., 1986 ; Knuepfer, 1988). Les méthodes employées sont relativement homogènes si l'on considère les mesures de surface (datation des surfaces) ou de subsurfaces (datation des dépôts) qui répondent, chacune, à des logiques différentes, à des buts différents aussi. Nous avons retenu la méthode de surface qui s'utilise sur des pas de temps courts (inférieurs au millier d'années) ; nous en présentons ici les grandes règles d'utilisation jusqu'à présent :

— mesure de 50 fragments affleurants minimum ;

— précision de 0,1 mm ;

— prise en compte du mode de la série pour déterminer l'âge de la surface ;

— épaisseur des cortex nulle à T zéro (postulat).

Nous avons modifié cette méthode pour les raisons suivantes :

— alors qu'aucune distinction typologique des cortex n'a été faite dans les études précédentes, il nous est apparu impossible de regrouper sous le même nom des cortex présentant des caractères morphoscopiques ou morphologiques extrêmement différents. Très récemment, Chiaki Oguchi a mené une étude sur des cortex de météorisation andésitiques au Japon ; elle

souligne de la même façon le manque de pertinence des mesures d'épaisseur de cortex sans discrimination typologique de ces derniers (Oguchi, 2000).

Nous avons donc distingué, sur la base des apparences de terrain, six types de cortex qui se développent indifféremment sur les diverses variétés de roches basaltiques. Cette typologie de terrain a été élaborée par l'examen préliminaire de 250 fragments rocheux prélevés au sein des terrains les plus anciens (moraine de fond du dernier pléniglaciaire surplombant la vallée de la Jökulsá). Basiquement, elle repose sur deux critères : la couleur du cortex (orange pour les types 1 et 3, gris-jaune avec pigmentations pour les types 2 et 5, jaune pour le type 4, blanc et rouge pour le type 6) et la morphologie du contact cortex/roche hôte (franc pour les types 1 et 2, diffus pour le type 4, irrégulier pour le type 3, racinaire pour le type 5). Les sédiments ont, par ailleurs, été discriminés suivant l'aspect macroscopique de leur lithologie (faciès A, B, C, D et E). Une description complète des cortex et faciès lithologiques est fournie dans les tableaux 1 et 2.

— du fait de la multiplication du nombre de types, nous avons porté le nombre minimum de mesures à 100 par dépôt ; l'échantillon traité ici est donc constitué de 980 mesures, plus de 4500 pour l'ensemble des dépôts de la vallée ;

— la précision de nos mesures est estimée à 0,25 mm, nous avons utilisé un réglet métallique gradué tous les demi-millimètres et une loupe aplanétique grossissement 10 fois ;

— l'âge des dépôts a été calculé par le recours à la lichénométrie, couplée avec les photographies aériennes ;

— le postulat de cortification nulle au moment du dépôt des moraines a été confronté au terrain : les moraines 1998 et 1999 ont été examinées dans la perspective de tester ce postulat.

— certains cortex ou faciès lithologiques, peu représentés dans la population sédimentaire, ont été écartés de l'analyse ultérieure (type 5 et 6, faciès E).

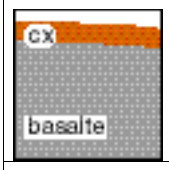
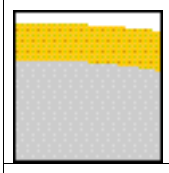
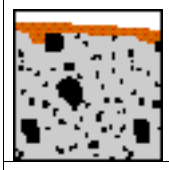
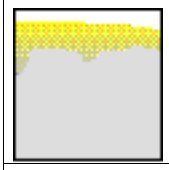
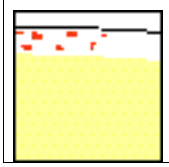
	Type de cortex	Aspect morphologique	Remarques
	**1**	couleur orange, homogène contact franc, épaisseur régulière	cortex d'oxydation, très répandu
	**2**	couleur gris-jaune, contact franc, épaisseur régulière	cortex de dissolution, très répandu
	**3**	couleur orange contact franc mais épaisseur irrégulière en liaison avec les phénocristaux affectés	cortex d'oxydation, très répandu.
	**4**	couleur gris-jaune contact diffus, épaisseur très irrégulière	cortex d'origine hydrothermale, non météorique et hérité
	**5**	couleur jaune contact diffus, épaisseur irrégulière avec des apophyses plongeant dans le lithoclaste (« cortex à racines »)	cortex réservé aux roches à texture planaire, les racines d'altération affectant des lits riches en plagioclases
	**6**	couleur blanche avec pigments rouges contact franc, épaisseur régulière	cortex typique des roches acides (rhyolites), très peu représenté (18 cas sur les 4500 mesures)

Tableau 1 - typologie descriptive des cortex de météorisation

Datation des terrains : lichénométrie

Nous connaissons précisément l'âge de deux des dépôts grâce aux photographies aériennes (premières campagnes en 1945) ou à la position morpho-stratigraphique (moraine du PAG, 1890), dépôts qui se positionnent fortuitement comme des extremums sur notre zone d'étude ; la datation des dépôts intermédiaires se fera par recours à la lichénométrie, dont le potentiel utile a déjà été démontré en

Islande, à condition d'en faire usage sur les deux derniers siècles (Caseldine, 1991), ce qui est précisément notre cas. Une courbe de croissance de *Rhizocarpon geographicum* a été établie sur le site étudié par Judith Maizels et Andrew Dugmore en 1983 (publiée en 1985), elle nous a servi de base de travail, même si nous avons dû procéder à quelques ajustements. La méthode lichénométrique employée est celle définie et utilisée par John Innes (1985) et Marie-Françoise André (1985) : mesure du diamètre de 50 individus, exclusion des thalles anormaux (seuil d'élimination : 20%), moyenne des 5 plus grands thalles normaux.

Faciès lithologique	**Description macroscopique**
A	basalte gris foncé à texture fine, cassure conchoïdale lisse, sans phénocristaux apparents
B	basalte gris foncé à texture moyenne, cassure rugueuse, quelques phénocristaux d'olivine
C	basalte gris à texture grossière, cassure très rugueuse, beaucoup de phénocristaux millimétriques (olivines, pyroxènes)
D	basalte gris clair, cassure rugueuse, sans phénocristaux
E	rhyolite

Tableau 2 - typologie descriptive des faciès lithologiques

Indices de météorisation

Les études de datation par corticométrie de surface soulignent toutes l'importance des autres processus de météorisation (desquamation, corrasion, gélifraction) dans l'acuité des résultats : la présence de galets saucissonnés, de blocs à facettes ou simplement lustrés, d'écailles suffisent à rejeter un dépôt du corpus de mesure (Birkeland, 1978) ; nous avons, au contraire, choisi de privilégier ceux-ci puisque la finalité de notre étude n'est pas de proposer une adaptation, en Islande, de cette méthode de datation, mais bien de proposer une hiérarchie des processus de météorisation, tant dans la chronologie de leur mise en œuvre que dans leur efficacité respective.

La gélifraction a été estimée en comptant le nombre de galets basaltiques éclatés — les éléments palagonitiques ayant été écartés en raison de leur trop grande sensibilité (fig. 2) — par unité de surface (surface de référence de 12 m², soit un rectangle de 3 x 4 m allongé parallèlement à la crête morainique) ; la corrasion a été repérée par le simple constat de présence/absence de lustre éolien (les micro-regs de vannage, parfois présents, ne suffisent pas à prouver l'activité de la corrasion), idem pour la desquamation dont nous avons noté la présence ou l'absence des écailles sur les blocs les plus volumineux (non sensibles au roulage).



Figure 2 : sensibilité des hyaloclastites à la gélifraction, insensibilité des basaltes après 4 années d'exposition à la météorisation.

2. Résultats

Datation des moraines

La courbe lichénométrique de Maizels et Dugmore nous permet de dater le dépôt des moraines limites à 1950 et 1895 respectivement ; nous savons que leur âge « vrai » est 1945 et 1890, il nous faut donc apporter un correctif de -5 ans sur la date livrée par la courbe. La constance de l'erreur dans le temps ne remet pas en cause le coefficient de linéarité calculé par Maizels et Dugmore, mais elle invite à revoir la durée de l'hystérésis entre le dépôt et la colonisation par le *Rhizocarpon geographicum*, précédemment estimée à 25 ans, et qu'il semble falloir ajuster à 30 ans sur ce site. La datation des moraines intermédiaires est relativement correcte,

même si des inversions chronologiques émanent des données lichénométriques (on parle d'inversion par rapport aux évidences morpho-stratigraphiques qui déterminent l'âge relatif des différentes moraines) : la présence de mares intramorainiques aux abords des moraines 6 et 7 peut suffire à modifier les conditions microclimatiques (variabilité du maintien des manteaux neigeux) et par la-même les vitesses de croissance des lichens (Benedict, 1990). Les moraines se regroupent alors en trois séries bien distinctes temporellement : la série des années 30 (moraines n° 3, 4, 5 et 6), la moraine de la réavancée de 1920 (n° 7) et les moraines de la fin du P.A.G. (n° 8, 9 et 10), auxquelles on ajoutera les moraines emboîtées 1998 et 1999 (n° 1) et la moraine 1945 (n° 2).

Epaisseur des cortex

Deux tendances s'observent : une augmentation de l'épaisseur des cortex avec le temps pour les associations de type A1, A2, B1, B2, C1 et C2 ; une répartition anarchique des données pour le cortex de type D4. Les cortex de type C3 n'ont pas été retenus plus avant car leur épaisseur est strictement dépendante de la nature et de la taille des phénocristaux affectés ; le développement est donc extrêmement variable, au sein d'un même dépôt, mais aussi au sein d'un même lithoclaste.

Le cortex jaunâtre de type D4 présente des valeurs extrêmement élevées atteignant 31 mm pour le cordon n°6 (fig. 3). Manifestement, ce cortex n'est pas d'origine météorique, il s'agit en réalité d'une enveloppe d'altération hydrothermale héritée.

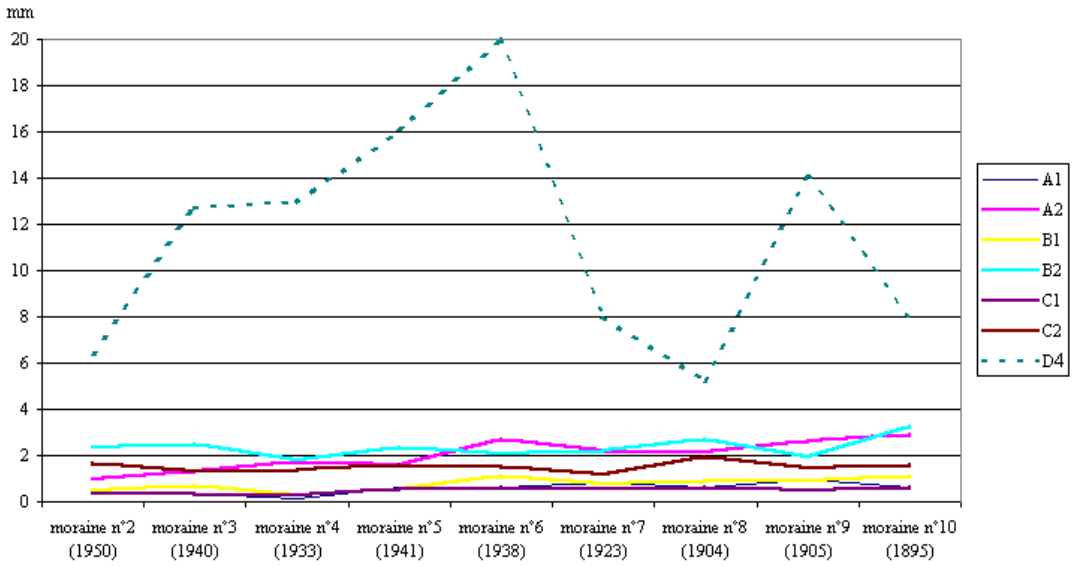


Figure 3 : épaisseur des cortex d'altération sur les moraines du Sólheimajökull (datations lichénométriques non corrigées)

Les autres cortex présentent des courbes de croissance quasi-linéaires regroupées au bas de l'échelle. Dans ces séries, deux groupes s'individualisent (fig. 4) : la série du cortex de type 1 dont les valeurs moyennes absolues n'atteignent pas 1,1 mm, et la série du type 2 toujours supérieure à 1,2 mm en moyenne et pouvant atteindre plus de 3,2 mm pour les dépôts les plus anciens.

Le cortex de type 1 correspond à une oxydation des éléments ferro-magnésiens ; cette oxydation apparaît dans la matrice puis gagne les phénocristaux.

Le cortex de type 2 montre la prédominance d'une dissolution des minéraux, olivines et plagioclases en tête.

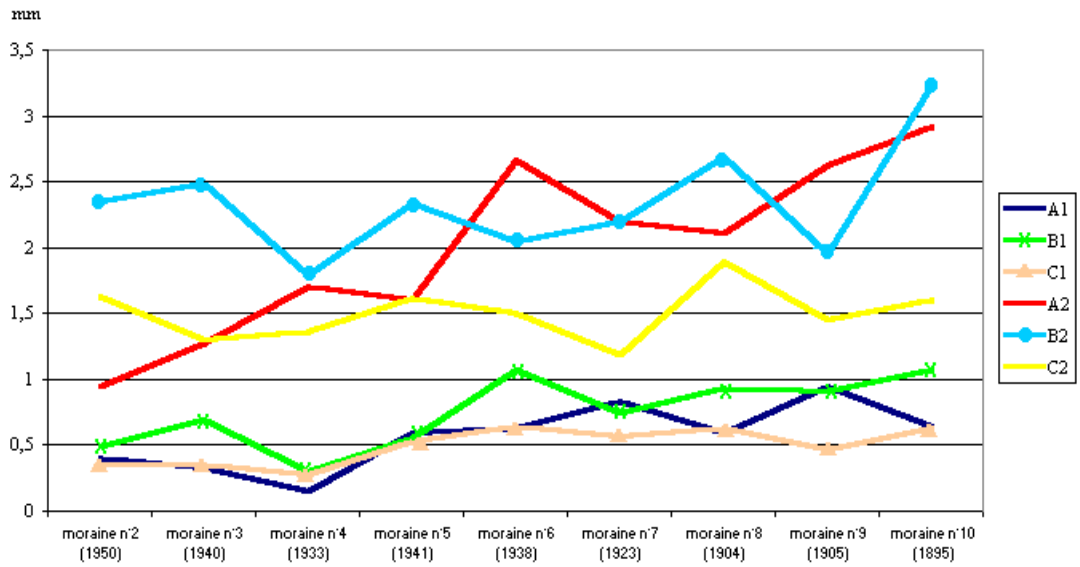


Figure 4 : épaisseur des cortex de météorisation sur les moraines du Sólheimajökull (datations lichénométriques non corrigées)

Test du postulat

L'inspection des moraines de poussée annuelles (1998 et 1999) montre la présence de nombreux cortex à T0 : 33 à 36 % des galets sont porteurs d'un cortex. Le type D4 est dominant (près de 90 %) puis viennent à égalité les types A2 et B2 dont l'épaisseur ne dépasse jamais 0,4 mm ; aucun cortex de type 1 n'a été trouvé. Ceci confirme la mise à l'écart nécessaire du type D qui ne peut être considéré comme un reflet de la météorisation subaérienne, le type D est donc bien d'origine « interne » et non pas météorique. La présence de quelques cortex d'altération météorique (3 à 4 par centaine de mesures) montre que le remaniement de sédiments anciens n'entraîne pas un décapage total des cortex, néanmoins la faible teneur de cortex héritée garantie un impact minime sur les données. Le cortex de type 1 (oxydation) apparaît aussi comme un indice de météorisation relativement sûr puisque totalement absent des sédiments au moment de leur dépôt.

Indices de météorisation

Sur le pas de temps d'étude, les indices d'une activité prédominante de la gélifraction restent rares, pour ne pas dire absents : la densité des gélifracts produits après le dépôt (repérés par la complémentarité des lithoclastes) n'atteint

jamais 1 par mètre carré ; il n' y a pas de logique de répartition en fonction du temps : les valeurs les plus élevées se rencontrent dans les moraines des années trente, les plus faibles dans celles de 1945. Bien sûr, l'insignifiance de la population oblige à la prudence sur l'interprétation que l'on peut faire du lien gélifraction/temps sur un siècle, toujours est-il que le phénomène est mineur.

La desquamation est quasiment absente des dépôts postérieurs aux années vingt ; elle apparaît timidement sur les blocs de la moraine 1920 et est plus fréquente sur ceux de la moraine P.A.G.

Les lustres éoliens sont également rares, alors qu'ils se généralisent sur les plateaux au-dessus de 350 m. Aux abords du front glaciaire, on en repère sur les moraines des années trente et quarante ; ils se développent préférentiellement sur la crête morainique et sur le versant proximal de la moraine ; logiquement, on ne les rencontre pas sur le versant distal, en position d'abri.

3. Analyse : origine des cortex

La présence simultanée de cortex différents sur un même basalte montre que les conditions micro-stationnelles ont une importance primordiale (plus que le facteur lithologique *a priori*) dans le conditionnement du type d'altération. Ces variations mésologiques se répercutent fortement sur les biocénoses, et notamment sur les éléments colonisateurs primaires, notamment les endolithiques : bactéries, micro-champignons, lichens ; qui sont plus sensibles aux variations de leur environnement proche qu'aux variations climatiques régionales (Karavaiko, 1978).

Nous avons procédé sur le terrain à des prélèvements de cortex suivis de mises en culture afin d'isoler les éventuelles populations fongiques, ceci en liaison avec notre discrimination typologique. Les méthodes de prélèvements et d'isolation sont décrites ailleurs (Etienne, soumis) ; les résultats partiels montrent que des associations caractéristiques peuvent être faites entre une communauté de champignons et un type de cortex donné (Etienne et Dupont, 2000 ; tableau 3).

Il est difficile de tirer d'ores et déjà des conclusions définitives puisqu'une partie des souches n'a pas pu être identifiée à ce jour. Toutefois quelques similitudes entre cortex apparaissent : les *Aspergillus* (fig. 5) sont présents dans chaque cortex de type 1, les *Trichoderma* étant eux associés avec le type 2. Les *Aspergillus* ont une action altérante très forte, leur faculté à dissoudre la silice, par exemple, étant bien connue ; les *Trichoderma* quant à eux sont des champignons à vitesse de croissance très élevée et régénération rapide, leur éventuelle action est donc amplifiée par le renouvellement incessant du mycélium.

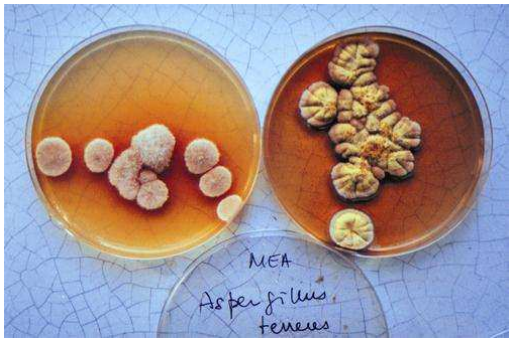


*Figure 5 : souches d'*Aspergillus terreus *Thom 1918, isolée dans un cortex de type 1.*

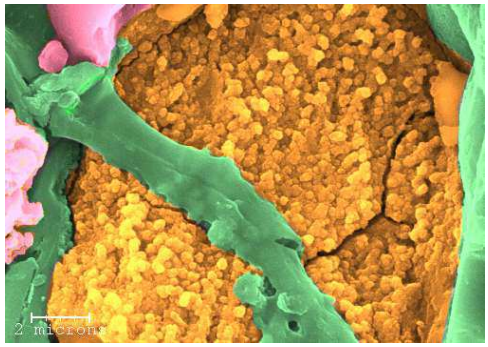


Figure 6 : agrégats d'oxydes de fer produits expérimentalement (souche : Apiospora montagnei).

La production expérimentale de nanomorphologies d'altération à partir de souches inoculées sur des fragments basaltiques sains permet de préciser l'action spécifique de certains champignons : des agrégats d'oxydes de fer ont, par exemple, été produits en laboratoire par *Apiospora montagnei* (fig. 6) ; des agrégats identiques avaient été préalablement observés dans un cortex de type 1 (cortex d'oxydation) où l'on avait isolé cette même espèce. Une dégradation des plagioclases le long des plans de clivage, observée dans un cortex de type 2, a également été reproduite en utilisant *Aspergillus niger* (fig. 7). Un large faisceau d'indices incite donc à attribuer, au moins partiellement, aux champignons un rôle majeur dans la production des cortex (Etienne, soumis).

Type de cortex	Espèces fongiques isolées
A1 (1 échantillon)	*Chrysosporium pannorum* (Link) Hughes 1958 *Mucor* sp. *Eupenicillium* sp. *Aspergillus* sp. 1 espèce stérile
B1 (2 échantillons)	*Paradiscula* Petrak 1941 *Penicillium citrinum* Thom 1910 *Aspergillus terreus* Thom 1918 5 espèces stériles 1 levure
C1 (1 échantillon)	*Aspergillus niger* *Penicillium* sp. *Apiospora montagnei* *Tolypocladium niveum*
A2 (1 échantillon)	*Verticilium catenulatum* *Penicillium* spp. *Pestaliotopsis* sp. *Trichoderma* sp.
B2 (2 échantillons)	*Absidia corymbifera* (Cohn) Sacc & Trotter 1912 *Phialophora verrucosa* *Chaetophoma* sp. *Digitosporium* sp. *Trichoderma* sp. *Acremonium* sp. 1 Coelomycète 3 espèces stériles
C2 (1 échantillon)	*Mucor* sp. *Penicillium* sp. *Trichoderma* sp.
D4 (1 échantillon)	*Penicillium* spp. 1 Ascomycète

Tableau 3 - Communautés fongiques et types de cortex

4. Analyse : évolution des cortex

Au-delà des limites spatiales que nous avons fixé pour cette présentation, la moraine du PAG, s'étend un complexe d'une quinzaine de sandurs et paléo-chenaux proglaciaires dont l'âge atteint 600 ans. Par ailleurs, la vallée de la Jökulsá est encadrée de plateaux coiffés par la moraine de fond du dernier pléniglaciaire et dont l'âge serait de 9600 ans au moins. Les mesures effectuées sur ces différents dépôts montrent une tendance au plafonnement des valeurs d'épaisseur des cortex. Au-delà de 200 ans, les cortex ne s'épaississent plus, certains montrant également une tendance à la diminution.

On entre ici dans une dynamique différente : après une phase de production corticale rapide, l'affaiblissement de la résistance de l'enveloppe externe permet la destruction du cortex ; on atteint donc dans un premier temps un équilibre entre la

production interne de cortex et sa destruction externe d'où le plafonnement des valeurs et l'horizontalité de la courbe de croissance. Des processus-relais entrent alors en action : la corrasion, dont on observe avec parcimonie le lustrage des sédiment et, probablement, la microgélifraction, même si aucun indice probant ne peut être relevé sur le terrain. A cette échelle de temps, la gélifraction semble nulle : elle ne concerne que des galets de hyaloclastites qui sont explosés en quelques années puis rapidement pulvérisés, mais elle n'atteint qu'un nombre extrêmement restreint de galets basaltiques (moins de 1 par mètre carré).

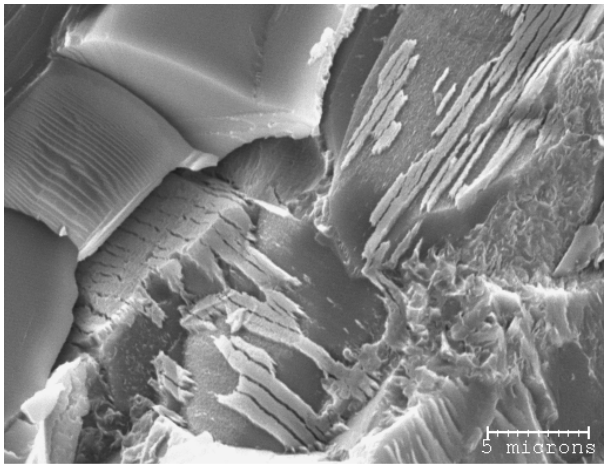


*Figure 7 : dégradation lamellaire expérimentale des plagioclases le long des plans de clivage sous l'action d'*Aspergillus niger.

La diminution des valeurs s'explique par une destruction plus rapide que la production ; ceci ne signifie pas forcément une inhibition de la production, mais davantage l'expression de la desquamation, que l'on n'observe pas sur les dépôts de moins de 70 ans et rarement sur ceux de la fin du XIX^{e} siècle. Le détachement d'une écaille est, à l'échelle d'un lithoclaste, un évènement de forte magnitude et de faible fréquence, ceci peut également expliquer l'allure parfois chaotique de la courbe lorsque le temps d'exposition augmente.

Conclusion

Les dépôts morainiques récents permettent des études qualitative et quantitative du développement des cortex de météorisation sur basaltes. A l'échelle du siècle,

l'altération, biochimique en grande partie, est le processus dominant de dégradation des sédiments. La corrasion éolienne participe au décapage sur les crêtes morainiques et sur le versant proximal des moraines, le versant distal étant davantage protégé. La desquamation n'est que très rarement active, elle demande une plus grande dégradation de l'enveloppe externe des sédiments, son action semble optimale à partir de 150-200 ans. Sur les cent premières années, le rôle de la gélifraction dans la comminution des galets basaltiques est nulle, celui de la microgélifraction est également peu probable puisque le développement des cortex n'est pas entravé ; à l'instar de la desquamation, 150 à 200 ans semblent nécessaire avant sa possible mise en œuvre, mais il n'a pas encore été défini d'indices de terrain probants pour la détecter.

Bibliographie

André (M.-F.), « Lichénométrie et vitesses d'évolution des versants arctiques pendant l'Holocène (région de la Baie du Roi, Spitsberg, 79°N) », *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 1985, 34, p. 49-72.

Benedict (J.B.), « Lichen mortality due to late-lying snow : results of a transplant study », *Arctic & Alpine Research*, 1990, 22, p. 81-89.

Birkeland (P.W.), « Soil development as an indication of relative age of quaternary deposits, Baffin Island, N.W.T., Canada », *Arctic & Alpine Research*, 1978, 10, p. 733-747.

Caseldine (C.), « Lichenometric dating, lichen population studies and Holocene glacial history in Tröllaskagi, northern Iceland » in Maizels (J.K.) et Caseldine (C.), *Environmental change in Iceland : past and present*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991, p. 219-233.

Cernohouz (J.) et Solc (I.), « Use of sandstone wanes and weathered basaltic crust in absolute chronology », *Nature*, 1966, 212, p. 806-807.

Chinn (T.J.H.), « Use of rock weathering-rind thickness for Holocene absolute age-dating in New Zealand », *Arctic & Alpine Research*, 1981, 13, p. 33-45.

Colman (S.M.), « Chemical weathering of basalts and andesites : evidence from weathering rinds », *U.S. Geological Survey Professional Paper,* 1982, n° 1246, 51 p.

Colman (S.M.) et Pierce (K.L.), « Weathering rinds on andesite and basaltic stones as quaternary age indicator », *U.S. Geological Survey Professional* Paper, 1981, n° 1210, 56 p.

Etienne (S.), « Processus et vitesses de météorisation postglaciaire de surfaces basaltiques dans le sud de l'Islande », *Environnements périglaciaires*, 1999, 6, p. 63-75.

Etienne (S.), « Fungi weathering of basaltic rocks in a cold oceanic environment », *Earth Surface Processes and Landforms* (soumis).

Etienne (S.) et Dupont (J.), « Altération de sédiments basaltiques par des champignons en milieu froid : comparaison de données de terrain et de résultats expérimentaux », *RST 2000, 18e réunion des Sciences de la Terre*, 2000, p. 127.

Gellatly (A.F.), « The use of rock weathering-rind thickness to redate moraines in Mount Cook National park, New Zealand », *Arctic & Alpine Research*, 1984, 16, p. 225-232.

Karavaiko (G.I.), « Microflora of land microenvironments and its role in the turnover of substances » in Krumbein, (W.E.), *Environmental biogeochemistry and geomicrobiology*, Blackwell, Oxford, 1978, p. 397-411.

Knuepfer (P.L.K.), « Estimating ages of late Quaternary stream terraces from analysis of weathering rinds and soils », *Geological Society of America Bulletin*, 1988, n°100, p. 1224-1236.

Maizels (J.K.) et Dugmore (A.J.), « Lichenometric dating and tephrochronology of sandur deposits, Sólheimajökull area, southern Iceland », *Jökull*, 1985, 35, p. 69-77.

Oguchi (C.T.), « Rates of rock property changes with weathering : andesite gravel in fluvial terrace deposits in Naguno-ga-hara, Japan », *Science reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, 2000, 21 A, p. 59-88

Whitehouse (I.E.) et McSaveney (M.J.), « Diachronous talus surfaces in the Southern Alps, New Zealand, and their implications to talus accumulation », *Arctic & Alpine Research*, 1983, 15, p. 53-64.

Whitehouse (I.E.), McSaveney (M.J.), Knuepfer (P.) et Chinn (T.), « Growth of weathering rinds on Torlesse sandstone, southern Alps, New Zealand » in Colman (S.M.) et Dethier (D.P.), *Rates of Chemical weathering of rocks and minerals*, Academic Press, Orlando, 1986, p. 419-435.

Les missions de terrain ont pu être réalisées grâce au soutien financier du GDR « Recherches arctiques » (CNRS GDR 49) en 1998 et 1999, des Laboratoires de Géographie physique de Clermont-Ferrand (CNRS UPRES-A 6042) en 1999 et de Meudon (CNRS UMR 8591) en 1998 ; le prélèvement des champignons s'est fait durant un échange SOCRATES Université de Paris 8/ Université de Reykjavík (février-mars 1999).
Je remercie donc tout particulièrement les responsables de ces organismes pour leur contribution.