



HAL
open science

Processus et vitesses de météorisation postglaciaire de surfaces basaltiques dans le sud de l'Islande

Samuel Etienne

► **To cite this version:**

Samuel Etienne. Processus et vitesses de météorisation postglaciaire de surfaces basaltiques dans le sud de l'Islande. Environnements périglaciaires, 1999, 24 (8), pp.63-75. halshs-00116862

HAL Id: halshs-00116862

<https://shs.hal.science/halshs-00116862>

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.

Processus et vitesses de météorisation postglaciaire de surfaces basaltiques dans le sud de l'Islande.

Samuel ETIENNE

Université de Paris 8, UMR 8591 Meudon-Bellevue,
UPRES-A 6042 Clermont-Ferrand, GDR 49 *Recherches arctiques*.

Adresse : Laboratoire de Géographie Physique CNRS UMR 8591, 1 place Aristide-Briand, 92195 Meudon cedex.
Mél : nunatak@wanadoo.fr

Les travaux récents sur la météorisation en ambiance froide s'accordent sur l'idée qu'elle n'est plus le fait des seuls processus liés au gel. La « chaîne météorique » des milieux périglaciaires est aujourd'hui perçue comme un système complexe de processus physiques, chimiques et mécaniques œuvrant de concert ou en relais et dont l'importance respective dépend avant tout de l'échelle d'observation.

Une étude à variables multiples de la météorisation des surfaces polies d'origine glaciaire dans le sud de l'Islande vise à mettre en évidence quelques-uns de ces processus de dégradation et les possibles variations géographiques de leur activité. Le calage chronologique offert par les surfaces glaciaires permet de suggérer des vitesses de formation de microformes en creux (vasques) et d'évolution des fissures superficielles dans les basaltes.

Variables

Trois variables ont été retenues dans cette étude ; elles concernent la lithologie, les topoclimats et la topographie.

Lithologie

Lithologiquement, les terrains offrent une certaine unité géochimique (basaltes tholéïtiques à olivine), mais des contrastes texturaux importants permettent une discrimination en trois catégories basée sur la macroporosité apparente des affleurements, c'est-à-dire la présence ou non de vacuoles de dégazage. Nous distinguerons donc, sur le terrain, les *basaltes massifs*, qui ne présentent pas de vacuoles visibles à l'œil nu ; les *basaltes vacuolaires* dont la microtopographie de surface est irrégularisée par la présence de vésicules (vacuoles non cristallines) ou d'amygdales (vacuoles cristallines) d'ordre millimétrique à centimétrique ; et les *basaltes scoriacés* qui correspondent à la partie inférieure d'une unité lavique et se caractérisent par une forte porosité, un aspect pulvérulent et une grande friabilité ; ce dernier type textural est peu représenté sur le terrain et les modelés glaciaires y sont mal, voire pas du tout, conservés.

Topoclimats

Les sites ont été choisis dans des secteurs offrant des conditions topoclimatiques variées (tableau 1, fig.1) : Núpaheiði (4 stations) est en position *sublittorale* : la ligne de rivage est située à 3 km au sud des affleurements et la configuration topographique (plaine d'épandage de type sandur) ne diminue guère l'influence marine et des accumulations halines dérivées des embruns sont fréquentes ; le sud du Mýrdalsjökull accueille des sites ouverts vers le large (39 stations), mais avec une sévérité climatique plus marquée en raison d'un gradient altitudinal fort (pente moyenne de 10% sur le plateau) et la présence de la calotte glaciaire au-dessus de la zone (*sublittoral atténué*) ; le Lakagigar, enfin, est un secteur plus interne, situé à 500 m d'altitude, où l'influence du littoral est moindre (distance au trait de côte : 30 km), et où se manifeste une certaine « *continentalité* » (4 stations).

| site | altitude | température moyenne annuelle | précipitations moyennes annuelles |
|----------------------|----------|------------------------------|-----------------------------------|
| Nupaheiði | 100 m | +5°C | 1500 mm |
| Sud du Mýrdalsjökull | 0 m | +5,2°C | 2300 mm |
| Sud du Mýrdalsjökull | 1000 m | -0,8°C* | 3000-3500 mm* |
| Lakagigar | 500 m | +2,6°C* | 1200 mm* |

Tableau 1 : données climatiques locales des sites de mesures (* : estimations d'après données régionales)

Altitude

Finalement, deux transects ont été effectués au sud du Mýrdalsjökull afin d'individualiser la variable altitude : des données ont été recueillies entre 150 et 1050 m dans les trois faciès basaltiques décrits précédemment. L'importance de processus dont l'action est directement liée aux variations altitudinales (on pense avant tout ici au gel) peut ainsi être mise en exergue.

Temps

La durée d'exposition des affleurements est considérée comme homogène : toutes les surfaces choisies sont des témoins du dernier maximum glaciaire, libérées des glaces vers 9.600 BP (Hjartarson, 1991 ; Ingólfsson & Norðdahl, 1994). Ici comme ailleurs, nous considérerons que la période d'action de la météorisation démarre au moment de la déglaciation, même s'il est impossible de déterminer le maintien ou non d'une couverture morainique ou végétale sur les affleurements basaltiques, un problème commun aux autres régions nordiques (Sellier, 1998) ; cependant, la situation topographique des surfaces d'abrasion glaciaire au sein des plateaux plaide pour un dégagement rapide : les roches moutonnées ou les polis sont majoritairement en position dominante (replat structural) et la pente locale favorise l'évacuation des formations superficielles.

Méthodologie

La morphométrie des microformes associées à la dégradation des joints et des affleurements basaltiques a été mesurée selon la technique définie par M.-F. André (1995), qui l'avait elle-même adaptée de R. Dahl (1967). L'utilisation d'un pied à coulisse et d'un jeu de réglets métalliques permet, théoriquement, des mesures dont la précision atteint 0,1 mm. Cependant, en raison des conditions de mesures, de l'orthogonalité toute relative des instruments vis-à-vis des joints, nous pensons qu'il serait vain de garantir une précision supérieure à 0,25 mm.

L'élargissement des joints, c'est-à-dire l'écartement apparent des lèvres de la fissure par destruction météorique, a été mesuré sur 47 stations différentes (950 mesures) ; l'approfondissement, c'est-à-dire l'abaissement de la surface de référence au niveau de la fissure, a également été mesuré sur 47 sites (1200 mesures ; fig. 2 et 3). Le problème de l'hétérochronisme des joints, paramètre essentiel vu le contexte tectonique des sites (Etienne, 1998), ne peut être totalement écarté des mesures, cependant quelques précautions permettent d'en minimiser les effets : lors des relevés, les joints présentant des caractères « manifestement » différents de la population générale sont écartés — ainsi les joints fermés ne sont pas comptabilisés puisque leur physionomie est différente des joints environnants. La notion de différence « manifeste » est évidemment bien subjective ; nous proposerons ultérieurement un traitement des données brutes comparable à celui utilisé en lichénométrie : plutôt que de considérer l'ensemble de l'échantillon, on ne retiendra qu'un certain pourcentage, considéré comme représentatif de la population initiale de joints, méthode qui sera testée sur différents échantillons de mesures collectées en contexte tectonique actif (Islande) et inactif (Féroé, Laponie)

(Etienne, en préparation). Les valeurs livrées par un échantillon brut incorporent donc des éléments hétérochrones dont le principal effet est de *minimiser* les valeurs réelles de la météorisation : les discontinuités postglaciaires ont en effet évolué sur une période plus courte que la population de joints pré-holocène et abaissent donc les valeurs moyennes ; les valeurs données ici doivent donc être considérées comme des minima.

Figure 2 : Approfondissement des joints en fonction des variations altitudinales et lithologiques : résultats de mesures effectuées sur le plateau de Lakaland (en mm).

Résultats

Météorisation des joints

Il apparaît clairement que les basaltes massifs présentent une topographie moins marquée par la météorisation que les autres basaltes. Leur sensibilité relative à la destruction météorique est donc moindre que les basaltes vacuolaires, eux-mêmes plus résistants que les basaltes scoriacés (tableau 2). Les rapports d'une texture à l'autre oscillent entre 1,1-1,3 (vacuolaires/massifs) et 3,0-3,5 (scoriacés/massifs).

| Localisation | Type de basalte | Profondeur | Largeur | Indice d'évolution |
|--------------------------|-----------------|------------|---------|--------------------|
| Sud Myrdalsjökull | massif | 27,4 | 46,2 | 0,84 |
| | vacuaire | 33,5 | 55,0 | 0,82 |
| | scoriacé | 81,5 | 164,1 | 1,01 |
| Nupaheiði | massifs | 32,8 | 42,9 | 0,65 |
| | vacuolaires | 42,7 | 45,3 | 0,53 |
| Lakagigar | massifs | 23,0 | 40,7 | 0,88 |

Tableau 2 : Sensibilité à la météorisation en fonction de la macrotecture des basaltes

L'influence des topo-climats est également très nette (tableau 3) : les affleurements en position sublittorale présentent des joints excavés plus profondément que ceux en position interne (littoral atténué et « continental »), mais les joints des sites sublittoraux atténués par l'altitude présentent un élargissement plus marqué (7 à 20 %) que les sublittoraux stricts. L'approfondissement des joints est donc, relativement, plus rapide en position sublittorale, alors que c'est l'élargissement qui va se montrer de plus en plus efficace à mesure que l'altitude des sites va augmenter.

| Type de basalte | Topoclimat | Profondeur | Largeur | Indice d'évolution |
|-------------------|------------------|------------|---------|--------------------|
| Massif | Littoral | 32,8 | 42,9 | 0,65 |
| | Littoral atténué | 27,4 | 46,2 | 0,84 |
| | Continental | 23,0 | 40,7 | 0,88 |
| Vacuolaire | Littoral | 42,7 | 45,3 | 0,53 |
| | Littoral atténué | 33,5 | 55,0 | 0,82 |
| Scoriacé | Littoral atténué | 81,5 | 164,1 | 1,01 |

Tableau 3 : Sensibilité à la météorisation en fonction des topo-climats

La météorisation progresse-t-elle uniformément autour des discontinuités ? Nous avons calculé un *indice d'évolution* qui est le rapport entre la dégradation horizontale (largeur) et la dégradation verticale (profondeur) des joints ; cet indice est calculé ainsi :

$$e = (1/2l) / p$$

où e est l'indice d'évolution, l la largeur, p la profondeur.

Cet indice serait égal à 1 si la météorisation était homogène puisque la météorisation progresse dans deux directions (axe horizontal) en largeur (les deux lèvres du joint) alors qu'elle progresse selon une seule direction (axe vertical, vers le bas) en profondeur.

D'une manière générale, on constate que l'approfondissement des fissures est toujours plus rapide que leur élargissement ($e < 1$), ceci étant d'autant plus net que l'on se rapproche du littoral ; les sites armés de basaltes scoriacés ne sont pas concluants du fait du faible nombre de mesures, mais surtout de l'absence de la surface de référence qui minimise largement la valeur de la profondeur.

Discussion

Comparaison avec les travaux précédents

Les données recueillies en Islande, en ambiance subpolaire océanique transitoire vers un climat tempéré frais, montrent que les vitesses d'élargissement météorique des joints sont largement supérieures à celles fournies par les affleurements rocheux en milieu subpolaire (tableau 4) : alors qu'en Laponie, l'élargissement des joints granitiques offre au mieux des vitesses moyennes de 2,7 Bubnoff, les basaltes islandais oscillent autour de 5 B ; les contrastes d'approfondissement sont moins marqués, mais là encore les basaltes se désagrègent 1,4 à 1,8 fois plus vite que les granites lapons (tableau 5).

| Environnement | Localisation | Lithologie | Période (Ka) | B (mm.Ka ⁻¹) | Mesures | Source |
|------------------------------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------------|---------|-------------|
| Subpolaire | Laponie 68°N | Granites | 10 | 2,7 | 220 | André, 1995 |
| | | Amphibolites | 10 | 0,1 | 520 | André, 1996 |
| | | Quartzophyllades | 10 | 0,3 | 80 | André, 1996 |
| Subpolaire océanique de transition | Islande 64°N | Basaltes massifs | 9,6 | 4,7 | 463 | cette étude |
| | | Basaltes vacuolaires | 9,6 | 5,5 | 455 | cette étude |

Tableau 4 : Comparaison des vitesses d'élargissement des joints

Il est bien difficile, à ce stade, de départager l'influence lithologique de l'influence climatique. Cependant, les données (inédites) fournies par les basaltes des Iles Féroé que nous avons étudiés montrent une augmentation des vitesses de météorisation selon un gradient nord-sud (Islande → Féroé) ; l'efficacité des processus cryogéniques étant réduite par la déclinaison latitudinale, la tendance observée plaide donc en faveur de l'intervention de processus alternatifs.

| Environnement | Localisation | Lithologie | Période (Ka) | B (mm.Ka ⁻¹) | Mesures | Source |
|------------------------------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------------|---------|-------------|
| Subpolaire | Laponie 68°N | Granites | 10 | 2,0 | 220 | André, 1995 |
| Subpolaire océanique de transition | Islande 64°N | Basaltes massifs | 9,6 | 2,8 | 557 | cette étude |
| | | Basaltes vacuolaires | 9,6 | 3,6 | 622 | cette étude |

Tableau 5 : Comparaison des vitesses d'approfondissement des joints

Les données relatives au développement des vasques montrent des valeurs supérieures aux régions subarctiques, mais largement inférieures aux régions montagnardes (tableau 6). Les dynamiques paraissent donc radicalement différentes, le système périglaciaire de haute altitude ne pouvant être assimilé au système périglaciaire des hautes latitudes notamment sous influence océanique. Toutefois, cette remarque est à relativiser vu le faible nombre de mesures effectuées en haute montagne (2 à 8 mesures par site) et la disparité des périodes de référence (500 à 3300 ans dans ce dernier cas, 9600 à 10 000 ans dans les autres) ; cette disparité souligne de nouveau le problème de la soi-disant linéarité de la météorisation dans le temps, un précepte couramment accepté en géomorphologie mais qui attend toujours une hypothétique corroboration (Thorn, 1988).

On constate, par ailleurs, qu'à l'instar de la météorisation des discontinuités structurales les vasques s'approfondissent plus vite dans les basaltes massifs islandais que dans les roches plutoniques ou métamorphiques lapones ; par contre, leur extension latérale est toujours plus lente.

| Environnement | Localisation | Lithologie | Période (Ka) | Profondeur (mm) | | Largeur (mm) | | Longueur (mm) | | Nombre de mesures | Source |
|---|-----------------------------|--|--------------|-----------------|------|--------------|------|---------------|------|-------------------|----------------------|
| | | | | (mm) | (B) | (mm) | (B) | (mm) | (B) | | |
| Subpolaire | Laponie 68° N 500-1100 m | Quartzophyllades | 10 | 22,5 | 2,25 | 250 | 25 | 475 | 47,5 | 19 | André, 1996 |
| | | Micaschistes | 10 | 38 | 3,8 | 80 | 8 | 330 | 33 | 10 | <i>ibid.</i> |
| | Laponie 68° N 500 m | Dolomites | 10 | 70 | 7,0 | 180 | 18 | 420 | 42 | 3 | <i>ibid.</i> |
| | | Granites, syénites, migmatites acides | 10 | 20 | 2,0 | 250 | 25 | 500 | 50 | 236 | André, 1995 |
| Montagnard | Népal 25°N 3100-3900 m | Granites, syénites, xénolithes à biotite | 10 | 35 | 3,5 | 200 | 20 | 400 | 40 | 26 | <i>ibid.</i> |
| | | Granite | 3,3 | 35,0 | 10,6 | — | — | — | — | 5 | Shiraiwa & Watanabe, |
| | | Gneiss | 3,3 | 53,0 | 16,1 | — | — | — | — | 2 | |
| | | Granite | 0,5 | 2,8 | 5,6 | — | — | — | — | 8 | 1991 |
| | | Gneiss | 0,5 | 0,0 | 0 | — | — | — | — | 2 | <i>ibid.</i> |
| | | | | | | | | | | | |
| Subpolaire océanique de transition | Islande 64°N 90-600 m | Basaltes massifs | 9,6 | 62 | 6,5 | 131 | 13,6 | 172 | 17,9 | 84 | <i>cette étude</i> |

Tableau 6 : Morphométrie et vitesses de formation des vasques dans des environnements et des lithologies variés

Importance respective des processus de météorisation

L'importance de la microgélifraction peut être évaluée à partir de la variable altitudinale (fig. 4 et 5). Elle apparaît plus active pour les basaltes vacuolaires ou scoriacés que pour les basaltes massifs (pente des droites de régression). Pour ces derniers, un processus initial indépendant de l'altitude ($R^2 = 0,1$) semble responsable de la météorisation des joints. Rappelons qu'au regard de la variable topo-climatique, la position littorale détermine une météorisation beaucoup plus forte qu'en ambiance plus froide et moins humide (Lakagigar). La microgélifraction, seule, ne semble donc pas être le processus déterminant. En fait, son action est d'autant plus efficace que le matériau aura été préalablement préparé.

Quels processus alors ? En position sublittorale, on pense à l'haloclastie dont les effets spectaculaires (fig. 6) sont souvent mis en avant dans les régions océaniques (Wellman & Wilson, 1965 ; Lageat *et al.*, 1994 ; Sellier, 1997), mais on possède peu d'éléments pour circonscrire la zone de *spray* à l'intérieur des terres (jusqu'à quelle altitude les embruns peuvent-ils être répandus ?). Le fait que l'indice d'évolution montre un approfondissement plus rapide en milieu sublittoral qu'ailleurs va néanmoins dans ce sens : la concentration des sels se fait au fond des joints plus que sur leurs bords externes et il en va de même pour les vasques (Etienne, 1995). L'action des sels, mécanique et chimique, est donc concentrée le long de l'axe vertical et favorise l'approfondissement.

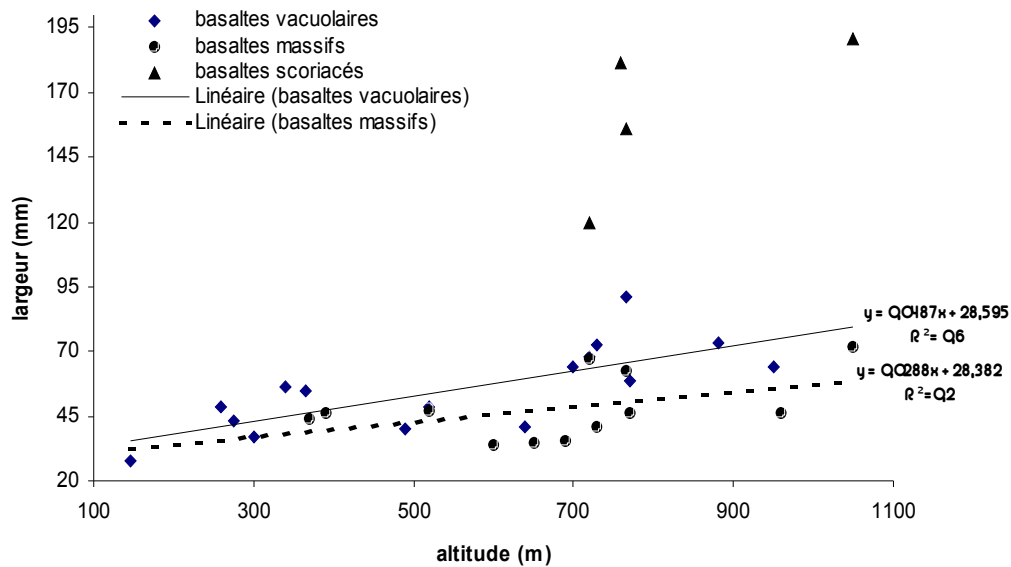


Figure 4 : Elargissement postglaciaire des joints au sud du Myrdalsjökull en fonction de l'altitude

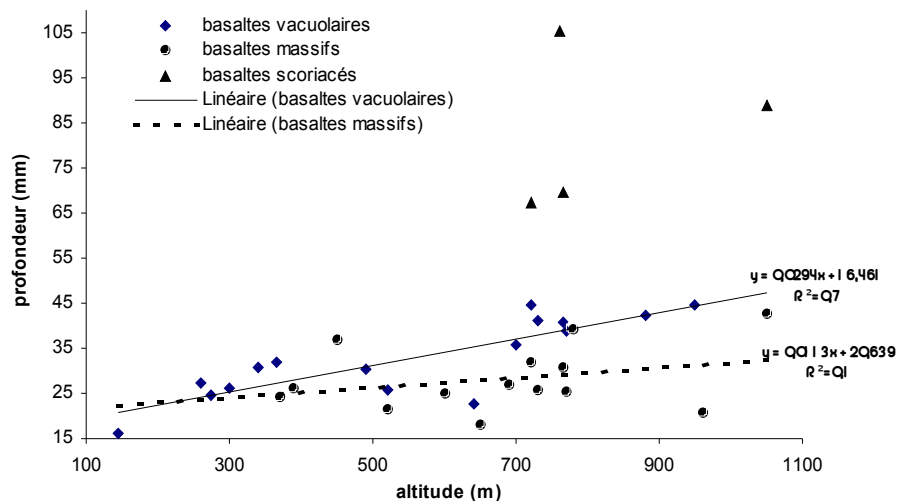


Figure 5 : Approfondissement postglaciaire des joints au sud du Myrdalsjökull en fonction de l'altitude

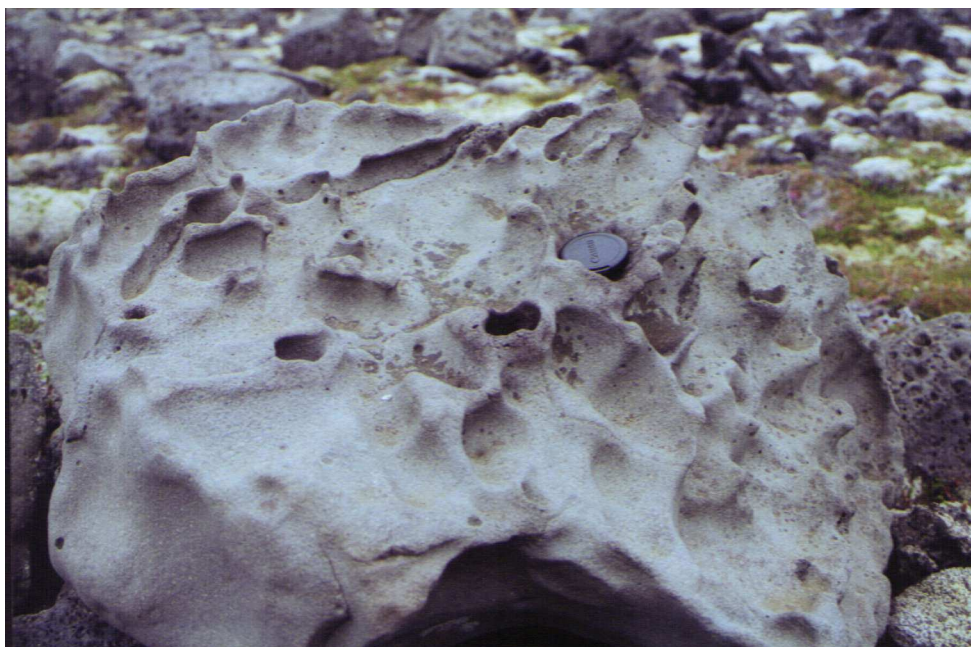


Figure 6 : Météorisation par l'action des sels marins d'un bloc de basalte massif. Víkur, S Islande.

Après avoir été longtemps dénigrés, les processus biogéniques se voient attribuer un rôle de plus en plus important dans la météorisation des milieux froids (voir notamment Dorn, 1998). Parmi les organismes impliqués, les lichens ont catalysé une grande partie des recherches récentes (Adamo *et al.*, 1997 ; Ascaso *et al.*, 1990 ;

Creveld, 1981 ; Gorbushina & Krumbein, 1999 ; McCarroll & Viles, 1995 ; Wierzchos & Ascaso, 1996 ; etc.) ; une des actions les plus significatives des lichens dans les roches basiques est l'extraction et la libération du fer qui entraîne une augmentation de la porosité de surface sur quelques millimètres, ainsi que nous l'avons observé (fig. 7), et qui peut conduire à des concentrations en fer cent fois moindre sous le lichen que dans la roche environnante (Johnston & Vestal, 1986). Ce processus agit strictement en surface : lorsque le plan rocheux poli est faiblement couvert (quelques centimètres d'épaisseur) par des dépôts superficiels, les lichens sont absents, la météorisation est nulle, le poli lisse et brillant ; en revanche, dès que la mise à l'affleurement est totale, la colonisation végétale (champignons, lichens) démarre et la météorisation (augmentation de la rugosité de surface) ne tarde pas à suivre (fig. 8). La dégradation biogénique est plus efficace au niveau des fissures et des cupules car ce sont les sites privilégiés d'installation et de développement des lichens, microchampignons et autres bactéries (Dorn, 1995). Par ailleurs, il est clair qu'une couverture superficielle déliquescence ne suffit pas à bloquer l'onde de gel et ne saurait inhiber la microgélifraction. La microgélifraction reste inefficace tant que les surfaces polies sont couvertes parce que l'état initial des surfaces d'abrasion glaciaire ne lui est pas favorable ; une préparation préalable à sa mise en action est indispensable et il est de plus en plus évident que les processus biogéniques se posent en acteurs incontournables.

Conclusion

L'évaluation des vitesses de météorisation à partir de la dégradation des joints structuraux relevés sur des surfaces d'abrasion glaciaire montre que les basaltes islandais sont plus sensibles à l'approfondissement que les roches plutoniques et métamorphiques scandinaves. L'efficacité du gel dans la météorisation postglaciaire semble subordonnée à la préparation préalable des matériaux rocheux ; parmi les processus initiaux ou alternatifs, l'altération biogénique et l'haloclastie apparaissent incontournables, cette dernière pouvant expliquer les vitesses d'approfondissement rencontrées en Islande sublittorale. L'action des agents biogéniques reste assujettie à un décapage initial des formations superficielles couvrant la surface rocheuse. Des études en cours visent à évaluer l'impact de la néotectonique sur les mesures livrées par les joints et à identifier les populations mycologiques présentes dans les cortex d'altération des basaltes islandais.

Remerciements

Les données présentées dans ce compte-rendu ont été obtenues lors de la mission de terrain 1998 financées par les laboratoires de géographie physique de Meudon-Bellevue (UMR 8591, dir. Tatiana Muxart) et de Clermont-Ferrand (UPRES-A 6042, dir. Marie-Françoise André) ainsi que par le GDR 49 *Recherches arctiques* (dir. Thierry Brossard) que je tiens à remercier. Je remercie également mes directeurs de thèse, Charles Le Cœur et Marie-Françoise André, pour leurs remarques et commentaires.

Bibliographie

Adamo, P., C. Colombo & P. Violante. 1997. Iron oxides and hydroxides in the weathering interface between *Stereocaulon vesuvianum* and volcanic rock. *Clay Minerals*, 32 : 453-461.

- André, M.-F. 1995. Postglacial microweathering of granite roches moutonnées in northern Scandinavia (Riksgränsen area, 68° N). In Slaymaker, O. (ed.), *Steepland geomorphology*, Wiley, Chichester, pp. 103-127.
- André, M.-F. 1996. Rock weathering rates in arctic and subarctic environments (Abisko Mts, Swedish Lapland). *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 40 : 499-517.
- Ascaso, C., L.G. Sancho & C. Rodriguez-Pascual. 1990. The weathering action of saxicolous lichens in the maritime Antarctic. *Polar Biology*, 11 : 33-39.
- Creveld, M.C. 1981. *Epilithic lichen communities in the alpine zone of southern Norway*. Ph.D. thesis, University of Utrecht, 287 p.
- Dahl, R. 1967. Postglacial micro-weathering of bedrock surfaces in the Narvik district of Norway. *Geografiska Annaler*, 49 A : 155-166.
- Dorn, R.I. 1995. Digital processing of back-scatter electron imagery : a microscopic approach to quantifying chemical weathering. *Geological Society of America Bulletin*, 107 : 725-741.
- Dorn, R.I. 1998. *Rock coatings*. Elsevier, Amsterdam, 429 p.
- Etienne, S. 1995. *Dynamiques et morphologie des côtes rocheuses d'Irlande du Nord : exemples entre Portstewart et Ballycastle*. Mémoire de maîtrise, Université de Nantes, 350 p.
- Etienne, S. 1998. *Etude de la météorisation des basaltes dans le sud de l'Islande*. Rapport de mission 98, CNRS UMR 8591 et UPRES-A 6042, document interne non publié, 14 p.
- Gorbushina, A.A. & W.E. Krumbein. 1999. The poikilotrophic microorganism and its environment. In Seckbach, J. (ed.). *Enigmatic microorganisms and life in extreme environments*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 473-492.
- Hjartarsón, Á. 1991. A revised model of Weischelian deglaciation in south and south west Iceland. In Maizels, J.K. & C. Caseldine (eds). *Environmental change in Iceland : past and present*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 67-77.
- Ingólfsson, Ó & H. Norðdahl. 1994. A review of the environmental history of Iceland, 13.000-9000 year BP. *Journal of Quaternary Science*, 9 : 147-150.
- Johnston, C.G. & J.R. Vestal. 1986. Does iron inhibit cryptoendolithic microbial communities ? *Antarctic Journal of the United States*, 21 : 225-226.
- Lageat, Y., D. Sellier & C.R. Twidale. 1994. Mégalithes et météorisation des granites en Bretagne littorale, France du Nord-Ouest. *Géographie Physique et Quaternaire*, 48 : 107-113.
- McCarroll, D. & H. Viles. 1995. Rock-weathering by the lichen *Lecidea auriculata* in an arctic alpine environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20 : 199-206.
- Sellier, D. 1997. Utilisation des mégalithes comme marqueurs de la vitesse de l'érosion des granites en milieu tempéré : enseignements apportés par les alignements de Carnac (Morbihan). *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 41 : 319-356.
- Sellier, D. 1998. Significations de quelques marqueurs des rythmes de la météorisation des granites en milieu tempéré océanique. *Cahiers Nantais*, 49 : 87-110.
- Shiraiwa, T. & T. Watanabe. 1991. Late quaternary glacial fluctuations in the Langtang valley, Nepal Himalaya, reconstructed by relative dating methods. *Arctic & Alpine Research*, 23 : 404-413.
- Thorn, C.E. 1988. *An introduction to theoretical geomorphology*. Unwin Hyman, Boston, 247 p.
- Wellman, H.W. & A.T. Wilson. 1965. Salt weathering, a neglected geological agent in coastal and arid environments. *Nature*, 205 : 1097-1098.
- Wierzchos, J. & C. Ascaso. 1996. Morphological and chemical features of bioweathered granitic biotite induced by lichen activity. *Clays and Clay Minerals*, 44 : 652-657.