



HAL
open science

Jean Malaurie et l'ébouilisation au regard de la recherche actuelle

Denis Mercier

► **To cite this version:**

Denis Mercier. Jean Malaurie et l'ébouilisation au regard de la recherche actuelle. Inter-Nord, 2023, 22, pp.78-90. hal-04099877

HAL Id: hal-04099877

<https://hal.science/hal-04099877v1>

Submitted on 17 May 2023

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.

Public Domain

JEAN MALAURIE ET L'ÉBOULISATION AU REGARD DE LA RECHERCHE ACTUELLE

DENIS MERCIER

Professeur des universités en géographie physique, Laboratoire de Géographie physique : environnements quaternaires et actuels, UMR 8591 du CNRS, Sorbonne Université
Professor of Physical Geography, Laboratory of Physical Geography: Quaternary and Current Environments, UMR 8591 of the CNRS, Sorbonne University, France

« Plus haut, la pente devient plus raisonnable, on chemine près du lit du torrent, entre deux versants d'éboulis et Malaurie se réjouit à la pensée d'en mesurer bientôt les pentes »

André de Cayeux (1949, p. 85)

Dans sa thèse magistrale soutenue à la Sorbonne le 9 avril 1962 et intitulée *Thèmes de recherche géomorphologique dans le nord-ouest du Groenland*, publiée ensuite aux éditions du CNRS en 1968, Jean Malaurie porte une attention centrale à la dynamique des versants et notamment à l'ébouilisation. Comme il l'écrit lui-même dans *Arctica 1*, « Je suis en fait, en 1950-1951, sur tous ces thèmes de géomorphogénie et cryopédologie, le premier géographe-physicien ayant opéré à ces hautes latitudes du nord-ouest du Groenland » et d'ajouter « Je l'ai découvert et passionnément étudié : les éboulis (ujarassuit), ignorés par les maîtres de la géographie générale, ils tapissent les grands versants des falaises groenlandaises et leur étude, m'a, en vérité, obsédé » (Malaurie, 2016, p. 10). Préalablement à ses recherches personnelles dans l'extrême nord-ouest du Groenland, Jean Malaurie avait été accompagné par le géologue André de Cayeux lors d'une expédition à Skansen sur l'île de Disko au Groenland occidental (69° N) dans le cadre des Expéditions françaises polaires conduites par Paul-Émile Victor (Cayeux, 1949).

L'ébouilisation peut être définie comme la combinaison de processus, allant de la gélifraction des roches dans les parois sous l'effet des alternances de gel et de dégel conduisant à la chute des fragments (gélifractions) par l'appel au vide et les

lois fondamentales de la gravité, qui concourent à la formation de dépôts sédimentaires de bas de versants appelés éboulis. Un ébouilissement étant défini par Jean Malaurie (1968, p. 253, fig. 1) : « Un ébouilissement au sens strict est essentiellement le résultat du détachement successif de pierres d'une paroi. Celles-ci, tombant en chute libre, au pied du mur, se calent les unes contre les autres. Elles constituent des amas au précaire équilibre dont le mouvement est l'effet de la force de la gravité réduite par les frictions que les pierres exercent les unes contre les autres ». L'ébouilissement est par conséquent un processus qui nécessite une combinaison de paramètres morphostructuraux particuliers (discontinuités dans les parois liés aux failles, aux diaclases ou aux plans de stratification et surtout fonction de la porosité des roches pour la pénétration de l'eau), de paramètres topographiques (présence d'une paroi et d'une dénivellation pour que s'exercent les lois de la gravité) et de paramètres morphoclimatiques spécifiques (combinaison d'humidité et d'alternances de gel et de dégel pour la fragmentation de la roche). Aussi, l'ébouilissement et la construction des éboulis corrélatifs se rencontrent essentiellement dans les environnements froids de la planète, aux hautes latitudes, chères à Jean Malaurie, et dans les hautes altitudes des différentes chaînes de montagne de la planète où ses conditions morpho-climatiques se rencontrent. Ces éboulis se retrouvent également sous

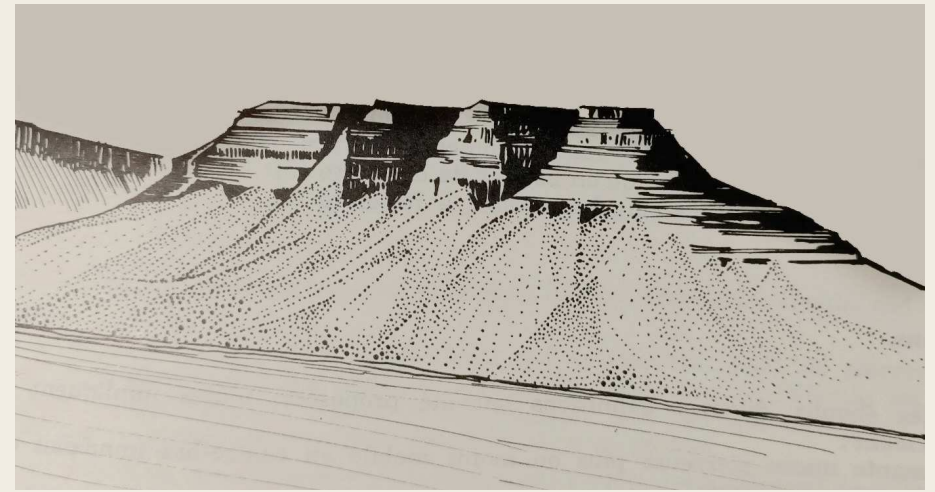


Figure 1 : Versants basaltiques de Gothavn sur l'île de Disko sur la côte ouest du Groenland
 © Jean Malaurie, 1968, p. 251

forme de dépôts hérités dans des environnements ayant connus des processus périglaciaires lors de séquences climatiques passées, notamment au cours des périodes froides du Pléistocène à des latitudes moyennes par exemple. Ainsi, ces environnements périglaciaires couvrent encore aujourd'hui 25 % de la surface terrestre auxquelles il faut ajouter 20 à 25 % de surfaces supplémentaires qui ont connu des conditions périglaciaires au cours des séquences froides du Quaternaire (Ballantyne, 2018).

Six décennies après la soutenance de sa thèse, la relecture de l'œuvre de Jean Malaurie sur l'ébouilissement permet d'en retenir les grands enseignements, de voir ce qu'il en dit lui-même dans *Arctica* (Malaurie, 2016) et de tenter de synthétiser ce que la science d'aujourd'hui apporte à cette question de l'ébouilissement et de la dynamique des versants dans les milieux froids.

1. L'ébouilissement selon Jean Malaurie

Comme l'écrit Paul Fénelon (1971, p. 533) dans sa recension de la thèse de Jean Malaurie, « il s'agissait en effet pour Jean Malaurie de savoir s'il y avait vraiment un modèle arctique spécifique du relief, selon la structure sans doute, mais surtout selon les processus d'érosion, de transport et d'accumulation

sous les paléoclimats et les climats actuels des régions polaires ». Pour Paul Veyret (1971, p. 150), la thèse de Jean Malaurie « apporte une contribution de valeur générale puisqu'elle renouvelle les fondements de notre connaissance scientifique des hautes latitudes ».

Dans la première partie de sa thèse, Jean Malaurie (1968) étudie notamment le rôle de la gélifraction, à la fois par des observations sur le terrain et par des expériences en laboratoire. Il insiste sur la complexité des processus à l'œuvre et sur le rôle central de l'imprégnation de l'eau dans les roches, de la porosité des roches pour l'accomplissement de la fragmentation par les alternances du gel et du dégel. Par des expériences, il montre que le schiste, la craie et le calcaire représentent les roches les plus à même de se fragmenter. Certaines roches massives du Nord-Ouest du Groenland ne sont pas propices à la fragmentation. Le cadre climatique favorable à la gélifraction dans la région de Thulé se limite au printemps. Jean Malaurie écrit (1968, p. 122), « la gélifraction est un processus essentiellement desquamatoire ». Au-delà des facteurs de prédisposition lithologiques, Jean Malaurie montre également que les secteurs les plus favorables à la gélifraction sont « les versants sarqaqs [adrets] encore enneigés après le dégel, au Sud de la Terre d'Inglefield, les versants alan-gogs [ubacs] au Nord ; les berges, les rives, les fonds

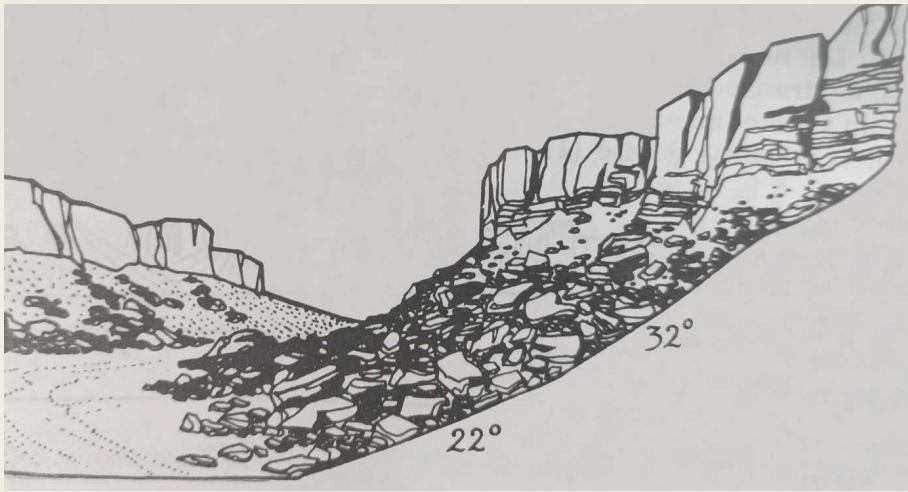


Figure 2 : Gorges d'Arak (exposition Est) dans le Massif du Hoggar, Sahara, janvier 1949
© Jean Malaurie, 1968, p. 283

de rivières et de lacs et les littoraux ». La conclusion de son analyse du processus de gélifraction a pu surprendre ses contemporains lorsqu'il écrit : « Les gels et dégels répétés ne feraient en somme qu'achever dans nombre de cas une fragmentation préparée de longue date par tout un complexe d'agents » (1968, p. 123).

Dans le livre III consacré aux talus d'éboulis, avec une étude comparée du massif du Hoggar et du Groenland, Jean Malaurie rappelle « il n'est d'éboulis que dans une topographie nettement différenciée (abrupt, vallée encaissée, falaise) offrant des conditions favorables de structure, de lithologie et de morphologie » (1968, p. 251). Pour Jean Malaurie (1968, p. 254), « passé une certaine épaisseur, l'éboulis groenlandais, gelé en permanence, est protecteur du substrat ; en-deçà, sa matrice – si matrice il y a – peut concourir à sa comminution ». La morphologie des éboulis fait l'objet de nombreuses observations rassemblées dans le chapitre IV de sa thèse (pages 295 à 313) et dans le chapitre V sur les pentes d'éboulis (pages 315 à 327). À propos des angles de ces formes d'accumulation, Jean Malaurie écrit à la page 324 « Quel que soit le climat considéré, l'angle d'un talus s'établit entre 39° et 14°. Au-dessus de 39°, la pierre ne « tient » pas ; au-dessous de 14°, l'action de la pesanteur n'opère plus isolément sur la

mobilité ; d'un éboulis vif, on passe à un éboulis mort ou à un organisme solifluant. Cette pente critique, au Groenland, s'établit en bas de pente aux alentours de 20 à 28° » (figures 2 et 3).

Jean Malaurie étudie également l'âge et l'évolution des éboulis. Page 309, il écrit « initialement, l'éboulis est au principal de gravité. Au stade terminal, la solifluxion devient l'agent essentiel. L'éboulis passe de proche en proche au glacier rocheux. » et page 327 : « féconde pour l'analyse morphométrique nous est apparue enfin la notion d'âge d'éboulis. À l'éboulis jeune, relativement bien calibré et aux constituants mûs par la pesanteur, s'oppose l'éboulis évolué groenlandais au profil irrégulier, localement aplati par le gel ou la solifluxion et apparenté par sa dynamique aux glaciers rocheux ; on distingue l'éboulis très évolué dont le profil tend à se régulariser. »

2. Quelques enseignements sur l'éboulisation depuis les recherches pionnières de Jean Malaurie

Soixante ans après la soutenance de la thèse de Jean Malaurie (1962), de très nombreux travaux ont été conduits sur la dynamique des versants dans les milieux froids et notamment sur les emblématiques

cônes et talus d'éboulis, à la fois pour comprendre l'éboulisation et la combinaison des processus en action, sur les modèles corrélatifs eux-mêmes, et sur leurs significations morphodynamiques et paléo-environnementales.

2.1. - Les processus de fragmentation des roches

À la suite des travaux de Jean Malaurie, de nombreuses études ont porté sur les processus à la fois *in situ*, mais surtout en laboratoire et par modélisation numérique, pour comprendre les facteurs de contrôle de la gélifraction (propriétés des roches, alternances gel-dégel) qui produisent des fragments anguleux nommés gélifractions (Lautridou et Ozouf, 1978 ; Matsuoka, 2001 ; Matsuoka et Murton, 2008).

Théoriquement, la pression maximale créée par la congélation de l'eau est de 2100 kg/cm² à une température de -22°C, même si dans les faits, ce

maximum n'est que rarement atteint (French, 2018). Les principaux enseignements sur ces paramètres thermiques des roches et des sols sont résumés dans une synthèse récente sur la géomorphologie périglaciaire (Ballantyne, 2018). Le taux de transfert de chaleur dans la roche est déterminé par sa diffusivité thermique (conductivité thermique divisée par la capacité thermique volumétrique), mais cela est compliqué par les effets de la chaleur latente, de sorte que le gel et le dégel peuvent temporairement s'arrêter à 0°C (« zero curtain effect » (Ballantyne, 2018)). Il n'existe pas de température unique à laquelle l'eau gèle dans les roches, mais la proportion d'eau non gelée présente diminue à mesure que la température descend en dessous de 0°C. L'eau liquide présente dans la roche à des températures inférieures à 0°C, appelée "eau pré-fondue", existe en raison des effets de tension superficielle, de la présence d'impuretés dissoutes qui abaissent le point de congélation de l'eau et des effets de capillarité et d'adsorption. En laboratoire, les expériences



Figure 3 : Cône d'éboulis torrentiel, versant basaltique de Godhavn, île de Disko, août 1949
© Jean Malaurie, 1968, p. 297



Figure 4 : Sensibilité à la gélifraction des falaises calcaires dès le niveau de la mer sur la presqu'île de Brøgger (Ny-Ålesund, Spitsberg nord-occidental, 78°55'N, 11°55'E)
© Denis Mercier, 2016

menées notamment à Caen, ont montré l'influence de la vitesse de congélation, plus que l'intensité du refroidissement (Lautridou et Ozouf, 1978). La fracturation mécanique des roches soumises au stress lié à l'augmentation volumétrique de 9 % lorsque l'eau passe de l'état liquide à l'état solide dépend largement des discontinuités de la roche à différentes échelles (pores, fissures, joints...). La force de la liaison intergranulaire détermine aussi la résistance à la traction des roches intactes, et donc leur sensibilité à la fracturation ou à la désagrégation, mais elle varie fortement entre les types de roches. Les roches ignées, comme les granites ou les basaltes, et métamorphiques, comme les quartzites, pour lesquelles les grains sont soudés entre eux, sont très résistantes alors que les roches sédimentaires, comme les calcaires ou les grès, pour lesquelles les grains sont seulement cimentés ensemble, la résistance à la cryoclastie est plus faible (fig. 4). La porosité des roches varie de l'une à l'autre et ce paramètre détermine la quantité d'eau qu'une roche peut contenir. Si les roches magmatiques présentent souvent une porosité inférieure à 2 %, les roches sédimentaires peuvent atteindre 30 %. Or, pour un type de roche donné, la résistance à la traction a tendance à diminuer lorsque la porosité augmente. De plus, la porosité d'une roche

influence sa perméabilité, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle elle absorbe l'eau (Ballantyne, 2018). La température à laquelle la glace de ségrégation provoque la microgélivation, varie de manière significative avec la lithologie et est comprise entre -1°C dans des roches très poreuses ($> 20\%$) et -4°C dans des roches faiblement poreuses ($< 5\%$). Elle peut également se manifester dans des roches non saturées au départ quand un gel lent (saisonnier) est capable d'induire une migration prolongée de l'eau depuis une source d'humidité extérieure. Cette même microgélifraction se produit lors d'un gel rapide (diurne) si la roche présente un degré de saturation supérieur à 80 % (Matsuoka, 2001). Par ailleurs, des études en laboratoire ont montré que des variations thermiques de l'ordre de 2°C par minute pouvaient générer des chocs thermiques et contribuer à la fragmentation des roches, sans faire appel à des alternances de gel et de dégel et sans apport d'humidité (French, 2018).

Les observations de terrain ont précisé le calendrier de l'ébouilisation qui dépend des environnements morphoclimatiques. Le printemps et l'automne sont souvent les périodes d'intensité maximale de ce processus au Spitsberg (Rapp, 1960), dans les Rocheuses (Gardner, 1971 ; Luckman, 1976), dans les Alpes (Francou, 1982).

Des approches par dendrochronologie permettent aussi de connaître le calendrier et la fréquence des chutes de pierres le long des versants boisés des chaînes de montagne. Ainsi, dans les Alpes suisses, Stoffel et al. (2005) montrent que l'activité de chutes de pierres est plus importante en avril et en mai. Les chutes de pierres le long des versants peuvent également être déclenchées par des tremblements de terre, des pluies intenses, une fonte rapide de la neige, le déplacement de la faune qui participent également à l'accumulation des fragments en bas des versants (Dorren, 2003).

2.2. - Les formes produites par l'ébouilisation : talus et cônes d'ébouil

Comme dans la thèse de Jean Malaurie, des études ont été menées sur les formes avec une reconnaissance des relations entre processus et modelés (Jahn, 1960 ; Rapp, 1960 ; Statham, 1976 ; Åkerman, 1984 ; Francou, 1987 ; André, 1991 ; Mercier, 2001 ; Sellier, 2002).

La thèse de Bernard Francou (1987) est un jalon remarquable dans la connaissance des dynamiques gravitaires. En comparant deux milieux de haute montagne que l'auteur a beaucoup parcourus, les

Andes centrales du Pérou sèches où le gel est fréquent, et les Alpes du Briançonnais où la neige peut rester au sol neuf mois, Bernard Francou analyse les granoclasses longitudinales croissantes vers l'aval en relation avec les lois de la gravité, les coulées de débris liées au ruissellement qui viennent perturber les granoclasses gravitaires, le rôle majeur de la neige dans le transfert des gélifractions, la notion de pente limite. Par des mesures de profils des cônes d'ébouil, Bernard Francou (1987) montre que les ébouils alpins ont un profil tendu dans la zone amont d'accumulation-transit et des profils concaves dans la zone distale d'accumulation pure. Il distingue une zone d'ébouil proximale avec un fort gradient de pente ($33-41^{\circ}$) associée à l'accumulation et au transport et une zone d'ébouil distale d'accumulation seulement. Les deux parties de ces ébouils sont séparées par une rupture dynamique (modèle biphasé).

Dans sa volumineuse thèse d'État sur les versants quartzitiques dans les montagnes de l'Europe du Nord-Ouest (Irlande, Écosse, Norvège) soutenue le 3 mai 2002, Dominique Sellier consacre une large part de son étude à l'ébouilisation. En effet, si les roches quartzitiques sont résistantes à l'érosion chimique du fait de la recristallisation de cette roche métamorphique siliceuse, elles sont très



Figure 5 : Cônes et talus d'ébouil développés à la base de parois quartzitiques du Rondslottet dans le massif des Rondane en Norvège (61°55'N, 9°52'E entre 1450 et 2000 m d'altitude)
© Denis Mercier, 1989



Figure 6 : Versant basaltique en cours de régularisation en Islande de l'ouest (64°21'N, 21°86'W)
© Denis Mercier, 2022

sensibles à l'érosion mécanique périglaciaire, notamment vis-à-vis de la macro-gélifraction à cause de l'abondance des discontinuités dont les plans de stratification (fig. 5). À l'aide de transects topo-sédimentologiques, Dominique Sellier montre toute la variété des cônes d'éboulis et des dynamiques à l'œuvre, depuis les éboulis liés à la gravité pure, jusqu'au éboulis remaniés par le ruissellement, les avalanches ou le fluage. Dans son analyse des temporalités, il montre le rôle majeur des processus de décohésion des parois suite au départ des glaciers et la mise en place des éboulis dans les tous premiers temps de la déglaciation. Son analyse des versants réglés, témoignant de l'aboutissement et de l'arrêt du processus d'éboulisation, propose une mise en place rapide dans les roches quartzitiques, dans les seuls temps post-glaciaires au moins pour ceux développés dans les cirques (Sellier et Kerguillec, 2019 ; fig. 6).

Aux profils pentus des cônes d'éboulis liés à la gravité, étudiés par Jean Malaurie, s'opposent désormais des profils des dépôts moindres associés à des processus de remobilisation des cônes, par le ruissellement notamment (Mercier, 2001 ; 2002 ; Mercier et al., 2009 ; Decaulne et Sæmundsson, 2010) ou des avalanches (Jomelli et Francou, 2000). Des recherches récentes font le lien entre

cet abaissement des profils longitudinaux des cônes et le changement climatique contemporain (Senderak et al., 2017). Au cours des 25 dernières années, le dégel du pergélisol, l'augmentation des précipitations liquides et l'accélération de la dégradation de la couverture neigeuse dans la région du Hornsund au Spitsberg sud-occidental, sont jugés responsables de processus de solifluxion et de l'abaissement des profils des cônes d'éboulis (Dolnicki et Grabiec, 2022). Ces mêmes paramètres morphoclimatiques jouent en faveur du développement des cônes de déjection analysés récemment dans la région centrale du Spitsberg par Tomczyk (2021).

2.3. - Les vitesses de l'éboulisation

Des recherches ont également porté sur les vitesses d'érosion en estimant les volumes construits par l'éboulisation, le volume des cônes, le calcul de la marge d'erreur de l'estimation du vide interstitiel au sein du dépôt, l'estimation du profil caché de la base du versant sous le dépôt (Sass, 2006). À ce propos, Jean Malaurie écrit « *faute de coupes naturelles, il m'est impossible de savoir comment était le contact entre l'éboulis et le socle sur lequel la masse des pierres, par gravité, glisse ou*

roule. Des échousses portatives, de nos jours, le permettraient » (Malaurie, 2016, p. 11). Au Spitsberg dans la région du Hornsund, une étude récente a utilisé des profils radar (*Ground Penetrating Radar* ou *GPR*) le long des axes des talus et permettent de connaître une épaisseur maximale des dépôts de débris de 25 à 30 mètres, épaisseur qui augmente logiquement vers la partie distale du cône d'éboulis (Dolnicki & Grabiec, 2022). Toujours au Spitsberg, mais dans la région centrale de Longyearbyen, les dépôts de pente ont été mesurés à l'aide d'un tomographe électrique (*electrical resistivity tomography* (*ERT*)) et donne comme résultat une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres dans la partie médiane du cône (de 26 à 42 m) et seulement de quelques mètres à l'apex (Siewert et al., 2012). Les taux de dénudation proposés pour l'évolution holocène de ces parois oscillent entre 0,33 et 1,96 mm par an pour les cônes d'éboulis (Siewert et al., 2012).

Pour ce qui concerne la vitesse de l'érosion, Jean Malaurie conclue sa thèse sur le Groenland par ces phrases « *L'érosion est lente, aussi lente que nous l'avions jugée sur les granites et grès des montagnes sahariennes du Hoggar. D'Ita à Thulé, en des secteurs de roches dures parfaitement datables,*

l'érosion depuis un siècle n'a pas révélé de recul cartographiable. Des esquilles, des écornages et écaillages : guère plus. L'expérience montre, au reste, que l'imprégnation en eau et la gélifraction d'une roche consolidée ne sont pas des opérations aisées » (1968, page 447).

Dans ses travaux de thèse de doctorat d'État sur les versants du Spitsberg, soutenue le 8 novembre 1991, dont Jean Malaurie fut président du jury, Marie-Françoise André (1991) analyse notamment des vitesses d'érosion à partir de calage chronologique basée sur l'utilisation de la lichénométrie. Les taux de recul des parois du Svalbard proposés par Marie-Françoise André vont de 0 à 1 580 mm par millier d'années. Dans le nord-ouest et le centre du Spitsberg, un recul des parois rocheuses à trois vitesses est suggéré (André, 1997). Pour les deux derniers millénaires : un écaillage biogénique très lent (2 mm ka-1), un recul modéré dû à l'éclatement par le gel (100 mm ka-1) et un recul rapide associé à la relaxation des contraintes postglaciaires (environ 1 000 mm ka-1). L'examen de la répartition des divers processus indique que le recul holocène de la plupart des parois rocheuses n'a pas dépassé un ou deux mètres. Les données lithologiques des roches



Figure 7 : Cônes d'éboulis partiellement fossilisés, cônes torrentiels et coulées de débris actives sur un versant basaltique du Tindastól dans la région du Skagafjörður en Islande (65°78'N, 19°61'W)

© Denis Mercier, 2012

métamorphiques étudiées semblent être le principal contrôle des taux de recul. Des taux plus rapides sont généralement associés à la relaxation des contraintes glaciaires ou à la susceptibilité locale au gel du substratum rocheux, souvent là où les affleurements présentent une forte densité de discontinuités. Ainsi, les dynamiques paraglaciales et les contraintes morphostructurales semblent jouer un plus grand rôle pour la construction des dépôts de pente que l'ébouilisation *stricto sensu*. Il en est de même en Écosse où Hinchliffe et Ballantyne (2009) et Ballantyne (2019) démontrent que les talus et les cônes à la base des versants ne résultent pas des seuls processus d'ébouilisation mais aussi de l'activité paraglaciale et de la météorisation et que leur formation se place dès le début de la déglaciation des versants écossais. La plupart de ces talus et cônes se sont mis en place lors de la période Tardiglaciaire, au cours des cinq millénaires qui ont suivi la déglaciation de l'Écosse. Des conclusions similaires sur l'importance des premiers temps de la déglaciation dans l'édification des dépôts de pente au regard des dynamiques actuelles se retrouvent dans différents environnements froids (Mercier, 2011 ; Scapozza, 2016, Veilleux et al., 2019).

Aujourd'hui, en utilisant les datations cosmogéniques, des chercheurs proposent des taux de dénudation des parois de montagne sur des milliers d'années. Dans les Alpes suisses, les taux de dénudation sont élevés dans tout l'Eiger et varient de 45 ± 9 cm kyr⁻¹ à 356 ± 137 cm kyr⁻¹ pour les derniers siècles à millénaires. Ces taux élevés sont interprétés comme le résultat d'une dénudation accomplie par des chutes de roches fréquentes à l'échelle centimétrique, associées à la dissolution chimique du calcaire (Mair et al., 2019). Toujours dans les Alpes, l'utilisation des datations cosmogéniques permet de démontrer le poids de la gélification dans les taux de dénudation de douze bassins versants situés dans le massif des Écrins-Pelvoux, à des altitudes allant de 1700 à 2800 m, dans un contexte de déglaciation (Delunel et al., 2010). Les taux de dénudation moyens varient de $0,27 \pm 0,05$ à $1,07 \pm 0,20$ mm/an sur des échelles de temps millénaires. Les résultats montrent une corrélation ($p2 = 0,56$) entre le taux de dénudation et l'élévation moyenne du bassin-versant, en l'absence de corrélation significative avec d'autres paramètres morphométriques (relief, pente, taille du bassin-versant, hypsométrie, etc). L'augmentation du taux d'érosion avec l'altitude est interprétée comme l'effet de processus contrôlés par le gel (Delunel et al., 2010).

2.4. – Le changement climatique contemporain, l'ébouilisation et les risques induits

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique contemporain, où les milieux polaires et les régions de hautes montagnes enregistrent des augmentations de températures supérieures à la moyenne mondiale (Mercier, 2021), les recherches sur les dynamiques des versants cherchent à comprendre l'impact de ces nouvelles conditions thermiques pour les chutes de pierres (Knoflach et al., 2021). À propos des changements climatiques, Jean Malaurie écrit dès 1968 : « *Les formes du terrain permettent de déceler elles aussi une sensibilité égale des forces d'érosion aux moindres fluctuations de ce milieu total. Visiblement, les seuils critiques des forces actuellement en présence sont proches et les reliefs contemporains sont eux-mêmes le résultat d'un équilibre qu'un réchauffement de quelques degrés, une plus grande humidité contribuerait à rompre irrémédiablement* » (page 445).

Des mesures précises des chutes de pierres sont réalisées à partir de suivis des parois par scanner laser terrestre ou par mesures lidar, avec une résolution de l'ordre du centimètre ou du décimètre selon les cas. Sur la face est de la Tour Ronde à 3792 m d'altitude dans le massif du Mont Blanc, la comparaison des modèles réalisés à partir des mesures de juillet 2005 et juillet 2006 a permis de quantifier les chutes de pierres. Le volume a atteint un total de 536 m³ sur la zone balayée, ce qui correspond à un taux d'érosion de 8,4 mm par an. Ce résultat est interprété comme la conséquence de la dégradation du pergélisol dans cette paroi rocheuse (Rabatel et al., 2008).

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de l'augmentation de la fréquentation de la haute montagne, les impacts des chutes de pierre sont parfois dangereux pour l'Homme. À cette fin, des approches par modélisation cherchent à prédire les zones d'instabilité et les zones à risque pour les hommes et les infrastructures (Dorren, 2003). Amorcée avec la fin du Petit Âge Glaciaire, la fonte contemporaine des glaciers déstabilise l'équilibre des versants (Fischer et al., 2006 ; Deline et al., 2012 ; Knoflach et al., 2021). Celle du pergélisol de parois est responsable de l'accroissement des écroulements rocheux comme l'ont très bien démontré les études réalisées dans le Massif du Mont Blanc (Ravanel et Deline, 2015 ; Ravanel et al., 2013, 2017). Au-delà de ces deux phénomènes d'ampleur qui rendent plus difficiles techniquement et plus dangereuses certaines courses d'alpinisme (Mourey et al., 2019a et 2019b),



Figure 8 : Les chutes de pierres, sur un versant basaltique dans l'axe d'un cône torrentiel (dont la partie distale est visible à gauche du cliché), et l'érosion littorale ont conduit les autorités islandaises à fermer la route côtière permettant de relier Ísafjörður et Bolungarvík dans la région des Westfjords. Un tunnel creusé dans la montagne permet depuis 2010 de relier les deux localités distantes d'une quinzaine de kilomètres (66°05'N, 23°09'W)

© Denis Mercier, 2022

des chercheurs se sont penchés sur les chutes de pierres dans la traversée du Grand Couloir du Goûter à 3270 m et la montée jusqu'à l'aiguille du Goûter (3863 m), sur la route de l'ascension au mythique Mont Blanc (Mourey et al., 2018). Les chutes de pierres sont les plus fréquentes entre 10h et 16h avec un pic entre 11h et 11h30. Pour mener à bien ses suivis, les chercheurs ont mis en place une batterie d'outils à partir de l'été 2016. Des capteurs de température du sol ont été installés pour caractériser l'état thermique du pergélisol, des appareils photographiques automatiques pour étudier l'enneigement, des capteurs sismiques pour mesurer l'occurrence et l'intensité des chutes de pierres et un capteur de fréquentation pour comptabiliser le nombre et la direction des alpinistes (Mourey 2019). L'inventaire exhaustif et l'étude détaillée des procès-verbaux rédigés par les secouristes à la suite de chaque intervention ont permis de mieux comprendre les accidents (Mourey et al. 2018). Ainsi, de 1990 à 2017, 102 personnes sont décédées, 230 ont été blessées et 55 sont sorties indemnes sur un total de 387 personnes secourues (347 opérations de secours). 84 % des personnes victimes d'un accident sont des amateurs non encadrés par un professionnel. Dans les gneiss très fracturés et

des pentes fortes (> 40°), la fonte du pergélisol et la fonte de la neige rendent plus fréquentes les chutes de pierres qui expliquent directement au moins 29 % des accidents et sont impliquées pour partie dans les dévissages qui sont à l'origine de 50 % des accidents. L'étude montre également que l'accroissement de la fréquentation de la haute montagne et le profil des alpinistes plus ou moins préparés sont des facteurs d'explication de cet accroissement de la dangerosité de cette ascension (Mourey et al. 2018).

Le long des axes de circulation, notamment pour ceux qui ont été construits au pied des parois rocheuses des environnements de montagne et dans les milieux froids, l'ébouilisation produit des fragments qui se retrouvent sur les routes et peuvent provoquer des dommages (fig. 8).

Pionnier dans l'étude de l'ébouilisation, Jean Malaurie a incontestablement apporté à la connaissance de cette dynamique des versants dans les milieux froids. Depuis la soutenance de sa thèse en 1962, les géomorphologues ont continué, et poursuivent encore aujourd'hui, l'étude de l'ébouilisation. L'approche fondamentale demeure privilégiée pour la connaissance des processus à l'œuvre dans un contexte de changement climatique qui concoure à

la modification des paramètres climatiques au sein des parois (fonte du pergélisol, fonte de la neige, modification des calendriers des processus de gel et de dégel). Cependant, les recherches sur l'ébouilisation se veulent aussi appliquées dans un contexte où l'augmentation de la fréquence de la pratique de la haute montagne s'avère parfois mortelles pour les alpinistes. Ainsi, à partir de l'étude des processus de l'ébouilisation, Jean Malaurie et ceux qui continuent d'étudier ses effets ont participé et poursuivent la connaissance des principaux paramètres qui régissent l'évolution des versants des milieux froids des hautes latitudes et des hautes altitudes, les lois mécaniques de la fragmentation des roches, le contrôle par le contexte morphostructural et celui par le contexte climatique.

« L'incertitude qui environne le chercheur dépasse les

BIBLIOGRAPHIE :

- Åkerman, H.J., (1984) - Notes on talus morphology and processes in Spitsbergen. *Geografiska Annaler Serie A Physical Geography*, 66, 4, pp. 267-284. <https://doi.org/10.2307/520850>
- André M.F. (1991) - *Dynamique actuelle et évolution holocène des versants du Spitsberg - Kongsfjord-Wijdefjord, 79° Nord*, Thèse d'État, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 653 p.
- André M-F. (1997) - Holocene rockwall retreat in Svalbard: a triple-rate evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 5, pp. 423-440. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199705\)22:5<423::AID-ESP706>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199705)22:5<423::AID-ESP706>3.0.CO;2-G)
- Aurégan P., Borm J. (2021), *Malaurie*, Paris, Éditions de l'Herne, 272 p.
- Ballantyne, C. K. (2018) - *Periglacial geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, Oxford, 454 p.
- Ballantyne, C.K. (2019) - *Scotland's Mountain Landscapes. A geomorphological perspective*, Dunedin Academic Press, Edinburgh & London, 183 p.
- Cayeux A. de (1949) - *Terre arctique : avec l'expédition française au Groenland*, Paris, Éditions Arthaud, 230 p.
- Decaulne, A., Sæmundsson, Þ. (2010) - Distribution and frequency of snow-avalanche debris transfer in the distal part of colluvial cones in central north Iceland. *Geografiska Annaler Serie A Physical Geography*, 92, 2, pp. 177-187. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2010.00388.x>
- Deline P., Gardent M., Magnin F., Ravanel L. (2012) - The morphodynamics of the Mont Blanc massif in a changing cryosphere: A comprehensive review. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94, 2, pp. 265-283. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00467.x>
- Delunel R., Peter A. Van der Beek P.A., Carcaillet J., Bourlès D.L., Valla P.G. (2010) - Frost-cracking control on catchment denudation rates: Insights from in situ produced ¹⁰Be concentrations in stream sediments (Ecrins-Pelvoux massif, French Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters* 293, pp. 72-83. doi:10.1016/j.epsl.2010.02.020
- Dolnicki, P., Grabiec, M. (2022) - The thickness of talus deposits in the periglacial area of SW Spitsbergen (Fugleberget Mountain side) in the light of slope development theories. *Land*, 11, 209. <https://doi.org/10.3390/land11020209>
- Dorren L.K.A. (2003) - A review of rockfall mechanics and modelling approaches, *Progress in Physical Geography*, 27,1, pp. 69-87. DOI: 10.1191/0309133303pp359ra
- Fénelon P. (1971) - Jean Malaurie. Thèmes de recherche géomorphologique dans le Nord-Ouest du Groenland. *Norvis*, 71, pp. 533-534. https://www.persee.fr/doc/noroi_0029-182x_1971_num_71_1_1873_t1_0533_0000_1
- Fischer L., Kaab A., Huggel C., Noetzelioogy J. (2006) - Glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: the Monte Rosa east face. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, pp. 761-772. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/761/2006
- Francou B. (1982) - Chutes de pierres et ébouilisation dans les parois de l'étage périglaciaire, *Revue de géographie alpine*, 70, 3, pp. 279-300, <https://doi.org/10.3406/rga.1982.2508>
- Francou B., (1987) - *L'ébouilisation en haute montagne : contribution à l'étude du système corniche-éboulis en milieu périglaciaire*. Thèse d'État, Université Paris VII, 689 p.
- French, H.M. (2018) - *The Periglacial Environment*, 4th ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA; Chichester, UK, 515 p.
- Gardner J.S. (1971) - A note on rockfalls and north faces in the Lake Louise area. *American Alpine Journal*, p. 317-318.
- Hinchliffe D., Ballantyne C.K. (2009) - Talus structure and evolution on sandstone mountains in NW Scotland. *The Holocene*, 19, 3, pp. 477-486. <https://doi.org/10.1177/0959683608101396>
- Jahn, A., (1960) - Some remarks on evolution of slopes on Spitsbergen. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 1, pp. 49-58.
- Jomelli, V., Francou, B. (2000) - Comparing the characteristics of rockfall talus and snow avalanche landforms in an Alpine environment using a new methodological approach: Massif des Ecrins, French Alps. *Geomorphology*, 35, 3, pp. 181-192. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00035-0)
- Knoflach B., Tussertschlager H., Sailer R., Meißl G., Stötter J. (2021) - High mountain rockfall dynamics: rockfall activity and runoff assessment under the aspect of a changing cryosphere, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 103, 1, pp. 83-102. <https://doi.org/10.1080/04353676.2020.1864947>
- Lautridou J.P., Ozouf J.C. (1978) - Relations entre la gélivité et les propriétés physiques (porosité, ascension capillaire) des roches calcaires, *Coll. Int. Altération et protection des monuments en pierre*, Paris.
- Luckman B.H. (1976) - Rockfalls and rockfall inventory data : some observations from Surprise Valley, Jasper National Park, Canada, *Earth surface processes*, vol. 1, p. 287-298. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010309>
- Mair D., Lechmann A., Yesilyurt S., Tikhomirov D., Delunel R., Vockenhuber C., Akçar N., Schlunegger F. (2019) - Fast long-term denudation rate of steep alpine headwalls inferred from cosmogenic ³⁶Cl depth profiles. *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46969-0>
- Malaurie J. (1955) - *Les derniers rois de Thulé*, Paris, Plon, 325 p.
- Malaurie J. (1968) - *Thèmes de recherche géomorphologique dans le nord-ouest du Groenland*, Paris, CNRS Editions, 495 p.
- Malaurie J. (2016) - *Arctica. Œuvres I, Ecosystème arctique en haute latitude*, Paris, CNRS Editions, 455 p.
- Matsuoka N. (2001) - Microgelivation versus macrogelivation: towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering. *Permafrost Periglacial Processes*, 12, pp. 299-313. DOI: 10.1002/ppp.393
- Matsuoka N., Murton J. (2008) - Frost weathering : recent advances and future directions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19, pp. 195-210. <https://doi.org/10.1002/ppp.620>
- Mercier D. (2001) - *Le ruissellement au Spitsberg. Le monde polaire face aux changements climatiques*, Clermont-Ferrand, Presses Universitaires Blaise Pascal, Collection Nature et Sociétés, 278 p.
- Mercier D. (2002) - La dynamique paraglacière des versants du Svalbard. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 46, 2, pp. 203-222. DOI: 10.1127/zfg/46/2002/203
- Mercier D. (2011) - *La géomorphologie paraglacière. Changements climatiques, fonte des glaciers et crises érosives associées*, Sarrebruck, Éditions universitaires européennes, 256 p.
- Mercier D. (dir) (2021) - *Les impacts spatiaux du changement climatique*, Londres, ISTE, 321 p.
- Mercier D., Étienne S., Sellier D., André M.-F. (2009) - Paraglacial gullying of sediment mantled slopes: a case study of Colletthøgda, Kongsfjorden area, West Spitsbergen (Svalbard), *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, pp. 1772-1789. <https://doi.org/10.1002/esp.1862>
- Mourey J. (2019) - *L'alpinisme à l'épreuve du changement climatique : Évolution géomorphologique des itinéraires, impacts sur la pratique estivale et outils d'aide à la décision dans le massif du Mont Blanc*. Thèse de l'Université Grenoble Alpes, 332 p.
- Mourey J., Marcucci M., Ravanel L., Pallandre F. (2019a) - Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 51, 1, pp. 176-189, DOI: 10.1080/15230430.2019.1612216
- Mourey J., Moret O., Descamps P., Bozon S. (2018) - Accidentology of the normal route up Mont Blanc between 1990 and 2017, *Fondation Petzl* www.fondation-petzl.org
- Mourey J., Ravanel L., Lambiel C., Strecker J., Piccardi M. (2019b) - Access routes to high mountain huts facing climate-induced environmental changes and adaptive strategies in the Western Alps since the 1990s. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, DOI: 10.1080/00291951.2019.1689163
- Rabatel A., Deline P., Jaillat S., Ravanel L. (2008) - Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: A case study in the Mont Blanc area. *Geophysical Research Letter*, 35, <https://doi.org/10.1029/2008GL033424>
- Rapp A. (1960) - Talus slopes and mountain walls at Tempelfjorden, Spitsbergen. *Norsk Polarinstittut Skrifter* 119, pp. 1-96.
- Ravanel L., Deline P. (2015) - Rockfall hazard in the Mont Blanc massif increased by current atmospheric warming. *Engineering Geology for Society and Territory*, 1, pp. 425-428. DOI: 10.1007/978-3-319-09300-0_81
- Ravanel L., Deline P., Lambiel C., Vincent C. (2013) - Instability of a high alpine rock ridge: The lower Arête des Cosmiques, Mont Blanc Massif, France. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95, pp. 51-66. <https://doi.org/10.1111/geoa.12000>

- Ravanel L., Magnin F., Deline P. (2017) - Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment* 609, pp. 132–43. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055>
- Sass O. (2006) - Determination of the internal structure of alpine talus deposits using different geophysical methods (Lechtaler Alps, Austria). *Geomorphology*, 80, pp. 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.006>
- Scapozza C. (2016) - Evidence of paraglacial and paraperiglacial crisis in Alpine sediment transfer since the last glaciation (Ticino, Switzerland), *Quaternaire*, 27, 2, pp. 139-155. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.7805>
- Sellier D. (2002) - *Géomorphologie des versants quartzitiques en milieux froids : l'exemple des montagnes de l'Europe du nord-ouest*, Thèse d'État, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 1 888 p.
- Sellier D., Kerguillec R. (2019) - Characterization of scree slopes in the Rondane Mountains (South-Central Norway), in Beylich A. (ed.) *Landscapes and landforms of Norway*, pp. 203-223. DOI: 10.1007/978-3-030-52563-7_9
- Senderak K., Kondracka M., Gadek B. (2017) - Talus slope evolution under the influence of glaciers with the example of slopes near the Hans Glacier, SW Spitsbergen, Norway. *Geomorphology*, 285, pp. 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.023>
- Siewert M.B., Krautblatter M., Christiansen H.H., Eckerstorfer M. (2012) - Arctic rockwall retreat rates estimated using laboratory-calibrated ERT measurements of talus cones in Longyear dalen, Svalbard. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.3297
- Statham I., (1976) - A scree slope rockfall model. *Earth Surface Processes*, 1, 1, pp. 43-62. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010106>
- Stoffel M., Lièvre I., Monbaron M., Perret S. (2005) - Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgüfer (Swiss Alps) - a dendrochronological approach, *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 49, 1, pp. 89-106.
- Tomczyk A.M. (2021) - Morphometry and morphology of fan-shaped landforms in the high-Arctic settings of central Spitsbergen, Svalbard, *Geomorphology*, vol. 392. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107899>
- Veilleux S., Bhiry N., Decaulne A. (2019) - Talus slope characterization in Tasiapik Valley (subarctic Québec): Evidence of past and present slope processes. *Geomorphology*, 349, pp.106911. DOI : 10.1016/j.geomorph.2019.106911
- Veyret P. (1971) - Malaurie (J.). - Thèmes de recherche géomorphologique dans le Nord-Ouest du Groenland. *Revue de géographie alpine*, tome 59, n°1, pp. 149-150. https://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1971_num_59_1_1217_t1_0149_0000_1