



HAL
open science

Étude des fluctuations glaciaires de Petit Age de Glace dans le massif des Écrins : apports de la lichénométrie

Melaine Le Roy, Philip Deline

► **To cite this version:**

Melaine Le Roy, Philip Deline. Étude des fluctuations glaciaires de Petit Age de Glace dans le massif des Écrins : apports de la lichénométrie. Neige et glace de montagne : Reconstitution, dynamique, pratiques, 8, Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8, pp.51-64, 2009. halsde-00375599

HAL Id: halsde-00375599

<https://hal.science/halsde-00375599>

Submitted on 30 Mar 2011

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.

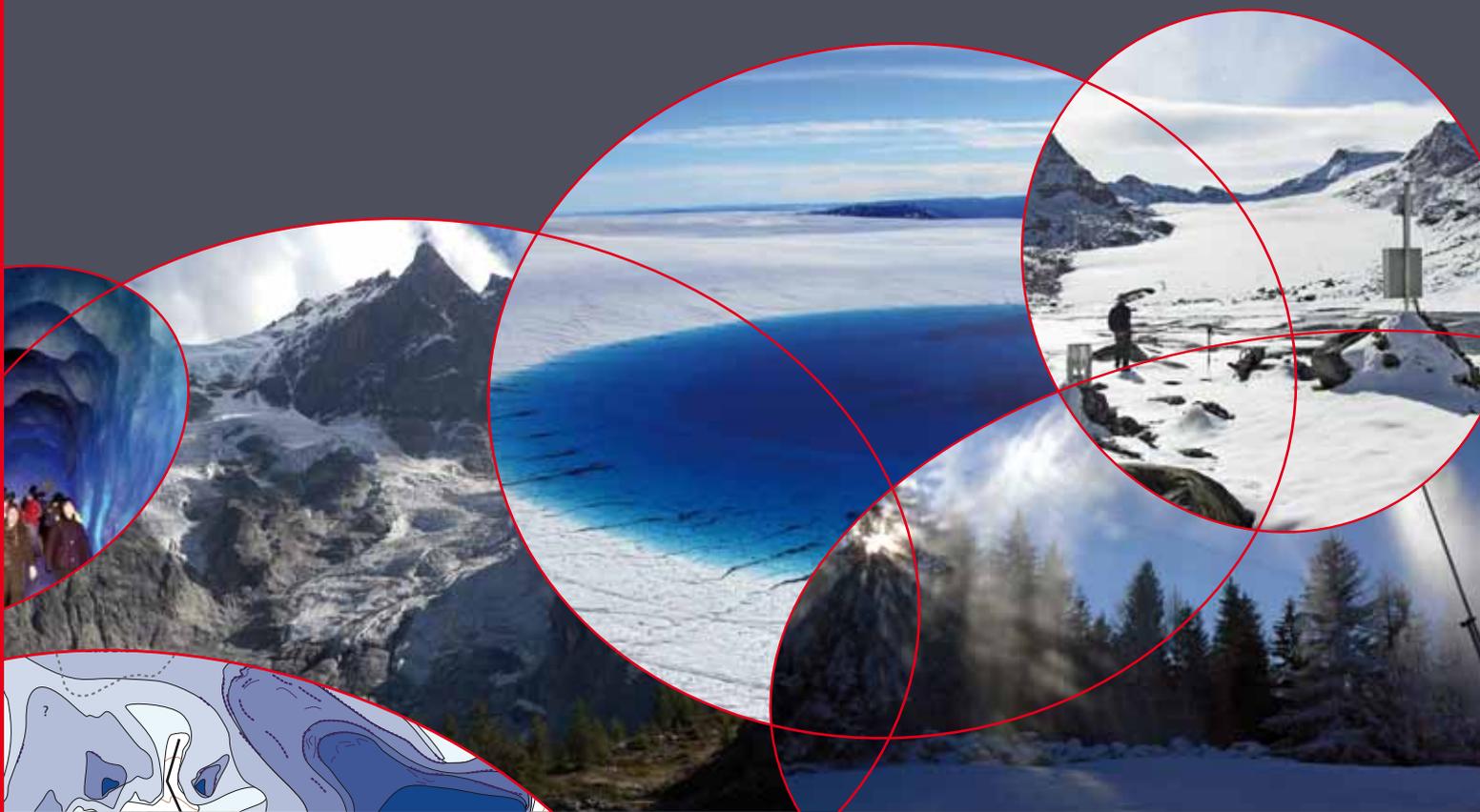
Collection
EDYTEM

Numéro 8 - Année 2009

*Cahiers de
Géographie*

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques



ÉTUDE DES FLUCTUATIONS GLACIAIRES DU PETIT ÂGE DE GLACE DANS LE MASSIF DES ÉCRINS

APPORTS DE LA LICHÉNOMÉTRIE

STUDY OF THE LITTLE ICE AGE GLACIAL FLUCTUATIONS IN THE MASSIF DES ECRINS

CONTRIBUTIONS OF THE LICHENOMETRY

MELAINE LE ROY ET PHILIP DELINE

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, F 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.

Contact : melaine.le-roy@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

La lichénométrie est une méthode de datation fréquemment utilisée pour reconstituer les fluctuations glaciaires du Petit Age de Glace (PAG) dans des massifs montagneux pour lesquels les données historiques sont très fragmentaires. Dans les Alpes, son utilisation est restreinte par des facteurs liés à la croissance du lichen sous les latitudes moyennes et par l'usage d'autres méthodes de datation plus précises (e.g. archives historiques ou dendrochronologie). Toutefois, dans les massifs où ces méthodes ne peuvent être mises en œuvre, elle constitue le seul moyen d'établir un cadre chronologique des fluctuations glaciaires sur la période considérée.

La construction d'une courbe de croissance pour Rhizocarpon sous-genre Rhizocarpon dans la vallée du Vénéon a permis de dater les moraines de la fin du PAG et de la décrue qui a suivi avec une précision de $\pm 5-25$ ans, et de proposer deux scénarios de mise en place des dépôts plus anciens. Les résultats ont été validés pour le XX^e siècle à l'aide de documents historiques. Les problèmes méthodologiques rencontrés sont également discutés.

MOTS-CLÉS : LICHÉNOMÉTRIE, PETIT AGE GLACIAIRE, MASSIF DES ECRINS, GLACIER.

ABSTRACT

Lichenometry is a dating method widely used to study Little Ice Age (LIA) glacial fluctuations in many arctic and alpine mountainous areas where historical data are sparse. In the Alps, very few studies have attempted to use lichenometry because of the more reliable nature of archive documents and dendroglaciological investigations, and because of the lichen growth pattern under mid-latitude climate. Despite of these limitations, lichenometry remains the unique tool to build a LIA glacial chronology for regions like the Massif des Ecrins, where other dating methods are unsuitable.

A growth curve for Rhizocarpon subgenus Rhizocarpon built in the Veneon valley allowed us (i) to date late LIA and contemporary retreat glacial deposits with a good accuracy ($\pm 5-25$ years), and (ii) to propose two scenarii for older deposits formation. Over the most recent period, results have been compared with available historical evidence. The methodological problems encountered have also been discussed.

KEYWORDS: LICHENOMETRY, LITTLE ICE AGE, MASSIF DES ECRINS, GLACIER.

INTRODUCTION

Les glaciers de montagne sont de bons indicateurs des fluctuations climatiques à l'échelle régionale, en particulier pour l'Holocène qui a connu de faibles variations de température (Denton et Karlén, 1973). Dans les Alpes, les fluctuations glaciaires du Petit Age Glaciaire (PAG) – du XIII^e au XIX^e siècle – et de la décrue qui a suivi, ont pu être reconstituées précisément lorsque la documentation historique est abondante et de qualité comme dans l'Oberland et le Valais (Zumbühl et Holzhauser, 1988) ou le massif du Mont Blanc (Nussbaumer *et al.*, 2007), où se trouvent les plus grands glaciers alpins. Durant le PAG ils sont descendus jusqu'à l'étage montagnard, ce qui a permis l'usage de la dendrochronologie et du ¹⁴C pour dater les récurrences glaciaires (Holzhauser *et al.*, 2005). D'autres régions ont été explorées plus tardivement – les premiers récits de voyage et observations glaciologiques dans le massif des Ecrins datent de la seconde moitié du XIX^e siècle (Bonaparte, 1890, 1891 ; Saint Romme, 1893) – et les fronts glaciaires n'y ont pas, à quelques exceptions près, atteint de secteurs boisés. L'acquisition d'un cadre chronologique du PAG pour les fluctuations glaciaires dans cette région doit donc faire appel à d'autres méthodes de datation.

La lichénométrie est une méthode de datation largement utilisée en géomorphologie depuis les années 1950 (Beschel, 1950). Malgré la faible prise en compte de la biologie des lichens (Jochimsen, 1966 ; Gallo et Piervittori, 1993 ; Loso et Doak, 2005), son succès est dû à sa mise en œuvre facile, son faible coût et son adéquation pour dater les formations glaciaires ou périglaciaires récentes. Si les meilleurs résultats sont obtenus pour les 500 dernières années (Innes, 1985 a) – période pour laquelle les datations ¹⁴C sont peu précises – certains auteurs étendent les potentialités de datation à plusieurs millénaires dans des régions arides, où les taux de croissance sont très lents. L'espérance de vie des lichens pourrait y atteindre 9000 ans (Denton et Karlén, 1973), contre moins de 1000 ans dans les Alpes (André, 1993). La lichénométrie a été employée pour dater de nombreuses formes et formations (glaciers rocheux, glissements, écroulements, lits fluviaux) dont les moraines du PAG et post-PAG (Winkler, 2004 ; Matthews, 2005 ; Rabatel *et al.*, 2005).

La méthode repose sur le présupposé suivant : le diamètre des plus gros lichens présents sur une surface est fonction de la durée pendant laquelle elle a été exposée

à leur colonisation. La taille des thalles donne donc un âge minimum de stabilisation de la surface lorsqu'elle est comparée à la courbe de croissance du lichen calibrée localement. Cette courbe peut être établie par mesure directe de la croissance radiale de thalles de différents âges sur plusieurs années (McCarthy, 2003), ou de manière indirecte en agrégeant les données mesurées sur des surfaces (anthropiques et/ou naturelles) déjà datées. D'autres approches, plus robustes sur le plan mathématique, ont été récemment proposées ; elles permettent le calcul de marges d'erreur statistiquement fiables sur les datations (Naveau *et al.*, 2007).

Du fait de la qualité des sources historiques, la lichénométrie a été relativement peu utilisée dans les Alpes pour dater les moraines, malgré les travaux pionniers de Beschel (1950, 1957, 1958). Dans les Alpes centrales italiennes, Belloni (1970) puis Baroni et Carton (1990) ont développé des courbes de croissance pour étudier les fluctuations post-PAG. Orombelli et Porter (1983) ont établi une courbe de croissance pour le massif du Mont Blanc, et Aeschlimann (1983), Bless (1984) et Wetter (1987) y ont daté des moraines du PAG. Proctor (1983) a appliqué la méthode directe en Valais, tandis que Federici et Stefanini (2001) ont daté les récurrences du PAG dans les Alpes Maritimes. Dans le massif des Ecrins, Miltenburg (1986) a utilisé la courbe d'Orombelli et Porter (1983) pour dater les moraines du glacier Noir. Pech *et al.* (2003) ont développé une courbe pour le Vénéon et la Vallouise – celle-ci a par ailleurs été utilisée pour étudier la dynamique de dépôts d'avalanche depuis le PAG par Jomelli et Pech (2004). En Vallouise, Cossart *et al.* (2006) ont également construits une courbe de croissance afin de dater des surfaces glaciaires sur la période post-PAG. En somme, seuls Federici et Stefanini (2001) ont appliqué la méthode pour l'étude du PAG dans toute sa durée à l'aide d'une courbe de croissance indépendante établie au préalable.

Le travail présenté dans cet article a donc deux objectifs :

- tester cette méthode de datation sur notre zone d'étude en confrontant les dates lichénométriques et des documents historiques pour la période post-PAG ;
- tenter de dater des moraines du PAG de ce massif, pour mieux appréhender la chronologie glaciaire de cette période.

I - SECTEUR D'ÉTUDE

La vallée du Haut Vénéon, au N.O. du massif des Ecrins (figure 1B), présentait un taux d'englacement de 11 % en rive gauche en 2003 (Le Roy, 2006), alors que la déglaciation est quasiment achevée sur la rive droite dont les versants sont plus exposés à la radiation

solaire (Aznavour, 1999). Un cumul pluviométrique de 991 mm/an (1965-2005) à Saint Christophe en Oisans-Préclos (1570 m) caractérise une vallée en position d'abri relatif et connaissant de fréquents épisodes de sécheresse estivale (Pech *et al.*, 2003). La lithologie du

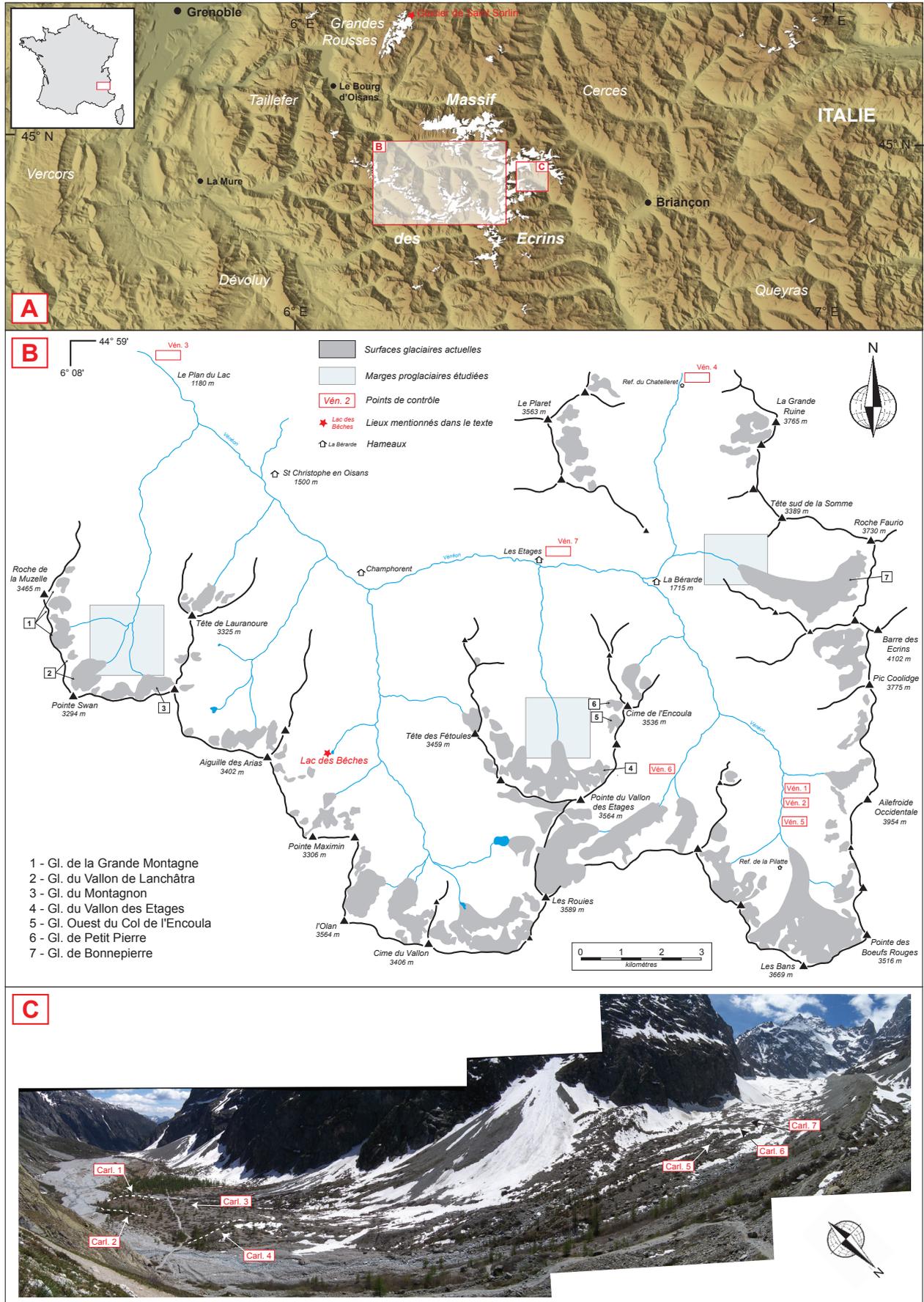


Figure 1 - Localisation du secteur d'étude.
 A : massif des Ecrins ; B : haute vallée du Vénéon ; C : Pré de Madame Carle (Vallouise).

secteur est relativement homogène : les granitoïdes forment l'ossature de la majorité des vallons (granite de la Bérarde, des Etages), les gneiss sont également présents, notamment sur les crêtes – gneiss amphiboliques et amphibolites dans le vallon de la Lavey par exemple (Barfety *et al.*, 1984). La forêt très éparse, principalement une formation à *Picea*, est circonscrite aux ubacs, avec une limite supérieure basse, vers 1900 m (Coûteaux, 1982). Quelques *Pinus* isolés sont notés jusqu'à 2200 m, mais *Larix* est très rare, à la différence de la vallée de la Romanche au nord, où il atteint 2150 m (Edouard, 1994).

Les marges proglaciaires étudiées dans le Haut Vénéon sont situées dans les vallons de Lanchâtra, des Etages et de Bonnepierre (figure 1B). L'établissement de la courbe de croissance s'est également appuyé sur des mesures faites au Pré de Madame Carle, en Vallouise (figure 1C) ; site où confluaient au PAG les

deux plus grands glaciers du massif (les glaciers Blanc et Noir), il est donc bien documenté depuis 1850 (Lagier et Masson, 1997).

Le vallon de Bonnepierre, dont les résultats sont présentés sur la figure 3, abrite l'un des grands glaciers du massif. Le glacier de Bonnepierre, dont le front actuel est à 2400 m, possède une couverture détritique sur toute sa zone d'ablation (< 2800 m). Sa superficie était de 258 ha en 2003, et de 320 ha au maximum du PAG, soit une perte de 19,4 % (les pertes des surfaces englacées des vallons de Lanchâtra et des Etages sont respectivement de 68,3 % et 61,7 % depuis le PAG). La grande moraine latérale droite (MLD) qui s'étend sur 3 km (entre 2130 m et 2900 m) possède un commandement important (*ca.* 20-30 m), hérité de l'ensemble du Néoglaciare. Vers 2550 m elle se subdivise en 3 cordons bien distincts (MA-MC) sur *ca.* 400 m (figure 3b). MA, le plus externe, est recouvert d'une pelouse rase.

II - LA MÉTHODE LICHÉNOMÉTRIQUE

La cartographie détaillée des moraines est un préalable pour décider de l'échantillonnage car elle permet d'avoir une vision globale de l'extension glaciaire passée et d'établir des correspondances entre les fragments de cordons morainiques contemporains. Elle s'est appuyée sur des orthophotographies de plusieurs missions de l'IGN et sur des relevés GPS de terrain.

1 - La mesure des lichens

Le genre le plus utilisé en lichénométrie est *Rhizocarpon* (lichens crustacés saxicoles). Nous avons travaillé sur un agrégat du sous-genre *Rhizocarpon* à thalle jaune, dénommé *Rhizocarpon geographicum* *agg.* (McCarthy, 2003) car l'identification au niveau du groupe (*i.e.* le niveau inférieur) avec une clé de détermination (Poelt, 1988) demande beaucoup de temps sur le terrain. Des taxons aux taux de croissance différents (Innes, 1982) ont dès lors pu être mesurés. Neuf espèces de *Rhizocarpon* à thalles jaunes ont par exemple été recensées dans les Hautes-Alpes (J. Asta, *com. pers.*).

Malgré des tentatives de standardisation (Innes, 1985a), les protocoles d'échantillonnage varient dans la littérature. Certains auteurs mesurent le petit axe, *i.e.* le diamètre du cercle inscrit, d'autres le grand axe, comme cette étude qui suit les préconisations de Innes (1985a). Les mesures effectuées à l'aide d'une règle en plastique transparente ont été reportées au millimètre près, assumant une marge d'erreur de ± 1 mm. Elles portent sur des thalles circulaires à subcirculaires. La mesure restrictive des seuls thalles circulaires qui est parfois pratiquée (Pech *et al.*, 2003) nécessite de fixer un seuil et restreint considérablement l'échantillon. A l'opposé, la mesure de thalles dont le grand axe est jusqu'à deux fois supérieur au petit axe a aussi été utilisée (E. Cossart, *com. pers.*). La

coalescence des lichens, indiquée par une rupture dans le motif des aréoles (mince bande d'hypothalle traversant le thalle ; changement de couleur des aréoles) entraîne leur rejet. Entre 50 et 100 mesures ont été effectuées sur chaque surface, c'est-à-dire sur chaque dépôt (*e.g.* moraine, dépôt d'éroulement). Seul le plus grand thalle mesuré sur chaque bloc est retenu. Les blocs échantillonnés étaient de préférence en position dominante, hors des secteurs défavorables à la croissance des lichens (couverture nivale persistante ou dépôts d'avalanches) (Jomelli et Pech, 2004 ; Cossart, 2005), et à distance des chenaux proglaciaires, qui au contraire influencent favorablement la croissance (Innes, 1985b) – d'autant plus que le stress hydrique peut être sensible dans le massif des Ecrins pendant la période végétative.

2 - Les courbes de croissance

Bien qu'une courbe existe déjà pour le massif (Pech *et al.*, 2003), nous en avons construit une seconde, car l'homogénéité des données (surfaces datées et surfaces à dater) conditionne la fiabilité des dates obtenues. Pour cela, il est préférable qu'un seul opérateur effectue toutes les mesures. De plus, le climat (surtout l'humidité) est l'un des principaux contrôles de la croissance des lichens, les surfaces datées doivent donc être les plus proches possibles des surfaces à dater et dans la même tranche altitudinale (Innes, 1985a ; Matthews, 2005). Nos points de contrôle (*i.e.* surfaces datées) (tableau 1) sont situés dans un rayon d'une vingtaine de kilomètres dans le Vénéon et en Vallouise, dont l'altitude et le climat sont comparables (Pech *et al.*, 2003) ; aucune surface anthropique n'a été échantillonnée, du fait d'altitudes et de tailles toujours inférieures à celles des surfaces à dater. Les marges d'erreur sur les dates des points de contrôles

Nom	Date	Description	Coordonnées	Altitude	Date de la mesure	Age de la surface (années)	n	Source	Moyenne des 5 plus grands thalles (mm)
Carl.1	1820 ± 5	Moraine frontale Glacier Noir	N 44° 55' 11", E 06° 24' 51"	1880 m	05/2007	186	81	Lagier & Masson (1997)	48,4
Carl.2	1855 ± 5	Moraine frontale Glacier Noir	N 44° 55' 15", E 06° 24' 49"	1885 m	05/2007	151	65	Lagier & Masson (1997)	45,4
Carl.3	1855 ± 5	Position du front Glacier Noir	N 44° 55' 12", E 06° 24' 43"	1885 m	05/2007	151	99	Lagier & Masson (1997)	45,4
Vén.1	1855 ± 2	Moraine frontale Glacier de la Pilatte	N 44° 53' 19", E 06° 19' 53"	2080 m	10/2006	151	88	Carte E&F /n Edouard (1994; p 241)	44,4
Carl.4	1880 ± 1	Moraine frontale Glacier Noir	N 44° 55' 16", E 06° 24' 38"	1910 m	05/2007	126	103	Lagier & Masson (1997)	43
Vén.2	1893 ± 1	Moraine frontale Glacier de la Pilatte	N 44° 53' 05", E 06° 19' 50"	2100 m	10/2006	113	86	Carte E&F /n Edouard (1994; p 241)	40,8
Carl.5	1904 ± 2	Position du front Glacier Noir	N 44° 55' 17", E 06° 24' 10"	2045 m	05/2007	102	55	Carte Jacob & Flusin (1905)	35
Vén.3	08/09/1908	Dépôt d'écroulement riv. dr. Plan du Lac	N 44° 58' 51", E 06° 08' 43"	1180 m	10/2006	98	74	Bourgeat (1980) / cliché 447- Fond RTM 38	30,8
Vén.4	1916	Dépôt d'écroulement Chatelleret	N 44° 58' 35", E 06° 18' 00"	2240 m	10/2006	90	37	Bourgeat (1980)	29,2
Carl.6	1924 ± 6	Moraine frontale Glacier Noir	N 44° 55' 17", E 06° 24' 07"	2060 m	05/2007	82	95	Etudes Glaciologiques Tome 7 (1934; p 85-87)	27,2
Vén.5	1925 ± 2	Moraine frontale Glacier de la Pilatte	N 44° 52' 47", E 06° 19' 47"	2160 m	10/2006	81	80	Clichés 1477, 1859, 2046 - Fond RTM 38	25,4
Vén.6	1951 ± 1	Position front Glacier du Chardon	N 44° 53' 31", E 06° 17' 57"	2125 m	10/2006	55	80	P.V.A. IGN 3435-3438-084 du 01/08/1952	16
Carl.7	1952 ± 3	Position front Glacier Noir	N 44° 55' 17", E 06° 24' 04"	2075 m	05/2007	54	47	P.V.A. IGN 3435-3438-157 du 01/08/1952 / Fond E&F 05	17,2
Vén.7	01/01/1990	Dépôt d'écroulement Les Etages	N 44° 56' 19", E 06° 15' 42"	1680 m	10/2006	16	61	D. Roche, com. pers.	9
MDG	1644	Moraine latéro-frontale droite Mer de Glace (Les Tines)	N 45° 57' 05", E 06° 54' 07"	1070 m	05/2008	363	18	Nussbaumer <i>et al.</i> (2007)	73
TRI	09/1717	Dépôt d'écroulement du Triolet	N 45° 52' 00", E 07° 02' 40"	1750 m	1977	260	1	Orombelli & Porter (1983)	75 (*1 +*)

Tableau 1 - Caractéristiques des points de contrôle utilisés pour la construction des courbes de croissance (n = nombre de thalles mesurés par surface)

reflètent la précision des sources utilisées et la difficulté de retrouver la position du front glaciaire sur le terrain (tableau 1).

Pour la construction de la courbe, certains auteurs retiennent le plus grand thalle par surface (figure 2A). Nous avons retenu la moyenne des diamètres des cinq plus grands thalles (figure 2C) afin de réduire l'incertitude (Innes, 1985a ; Pech *et al.*, 2003 ; Matthews, 2005), mais plusieurs variantes ont été testées (figure 2B). Deux approches concernent les surfaces récentes :

- largement employée, la dérivation de la courbe à partir de la moyenne des 5 plus grands diamètres pour chaque surface autorise une comparaison avec d'autres travaux ;
- une courbe basée sur les 10 plus grands diamètres a également été construite. Innes (1984a) la considère comme potentiellement plus fiable, même si le gain semble relativement faible.

Il existe des moraines manifestement déposées avant le début du XIX^e siècle sur notre secteur (Edouard, 1978), mais nous n'avons identifié aucun point de contrôle local assez ancien pour calibrer la courbe au-delà de cette date. Les deux autres courbes construites intègrent donc deux points de contrôles anciens situés dans le massif du Mont Blanc :

- la courbe 5+ MDG est complétée par un point de contrôle daté de 1644, sur la moraine latéro-frontale droite de la Mer de Glace, à 1070 m d'altitude (Nussbaumer *et al.*, 2007) ;
- la courbe 1+ TRI utilise les mesures faites en 1977 sur le dépôt de l'écroulement du Triolet datant de septembre 1717, et situé à 1750 m dans le Val Ferret (Orombelli et Porter, 1983). Ce der-

nier point est constitué d'une seule mesure (plus grand thalle par surface), la courbe 1+ TRI est donc construite sur cette base et la mesure a été actualisée en tenant compte du taux de croissance sur la zone. En revanche cette mesure concerne le petit diamètre, les âges dérivés d'après cette partie de la courbe seront donc des âges maximums. Cette courbe composite est définie par une fonction logarithmique sur le premier siècle et par une fonction linéaire ensuite car celle-ci décrit mieux les surfaces anciennes à partir du point de contrôle 1908.

Bien que des incertitudes soient introduites par l'utilisation de ces points anciens, éloignés des surfaces à dater et à une altitude parfois inférieure, ils permettent de contraindre la courbe de façon plus fiable qu'une extrapolation.

Etant données leurs caractéristiques, les courbes 5+ et 10+ seront préférentiellement utilisées pour dater les surfaces les plus récentes, tandis que les courbes 5+ MDG et 1+ TRI le seront pour les surfaces anciennes.

Les courbes de croissance développées ne donnent qu'une approximation du taux de croissance des lichens sur un secteur donné car, contrairement à des mesures directes, elles dépendent de la méthode employée ainsi que du nombre et de la dispersion des points de contrôle (figure 2A) – comme le montre la comparaison entre les trois courbes établies pour les mêmes vallées du Massif des Ecrins (figure 2C). Toutefois, le taux de croissance très faible observé dans les Alpes maritimes italiennes (figure 2A) résulte vraisemblablement du régime méditerranéen des précipitations, à été sec (Federici et Stefanini, 2001).

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de la datation des cordons morainiques des Trois Vallons sont présentés dans le tableau 2. Faute de place, seules les mesures lichénométriques du vallon de Bonnepierre sont présentées dans leur intégralité

(figure 3). La dénomination des cordons morainiques (M1, M2...) sur chaque site n'implique pas de correspondance chronologique entre les moraines.

Les dates lichénométriques respectent partout l'or-

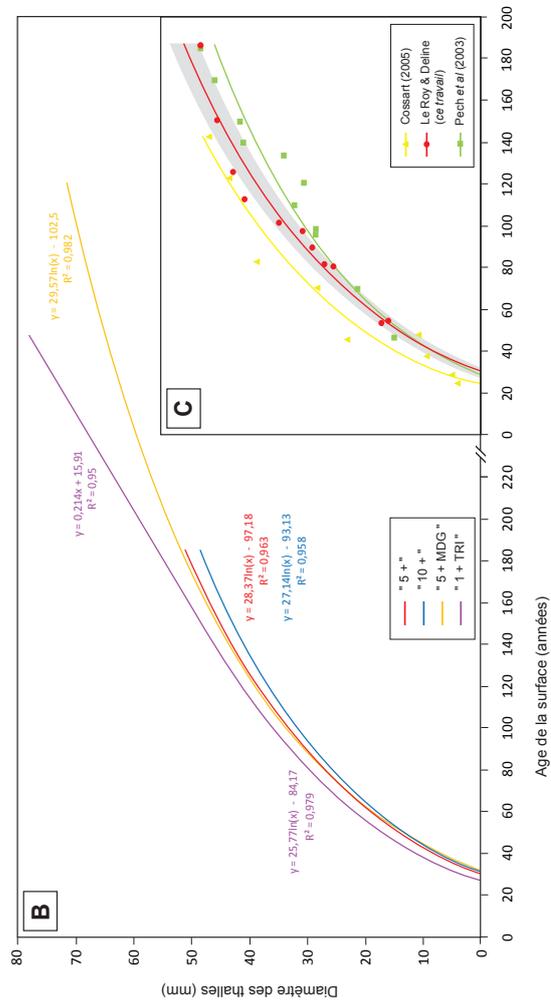
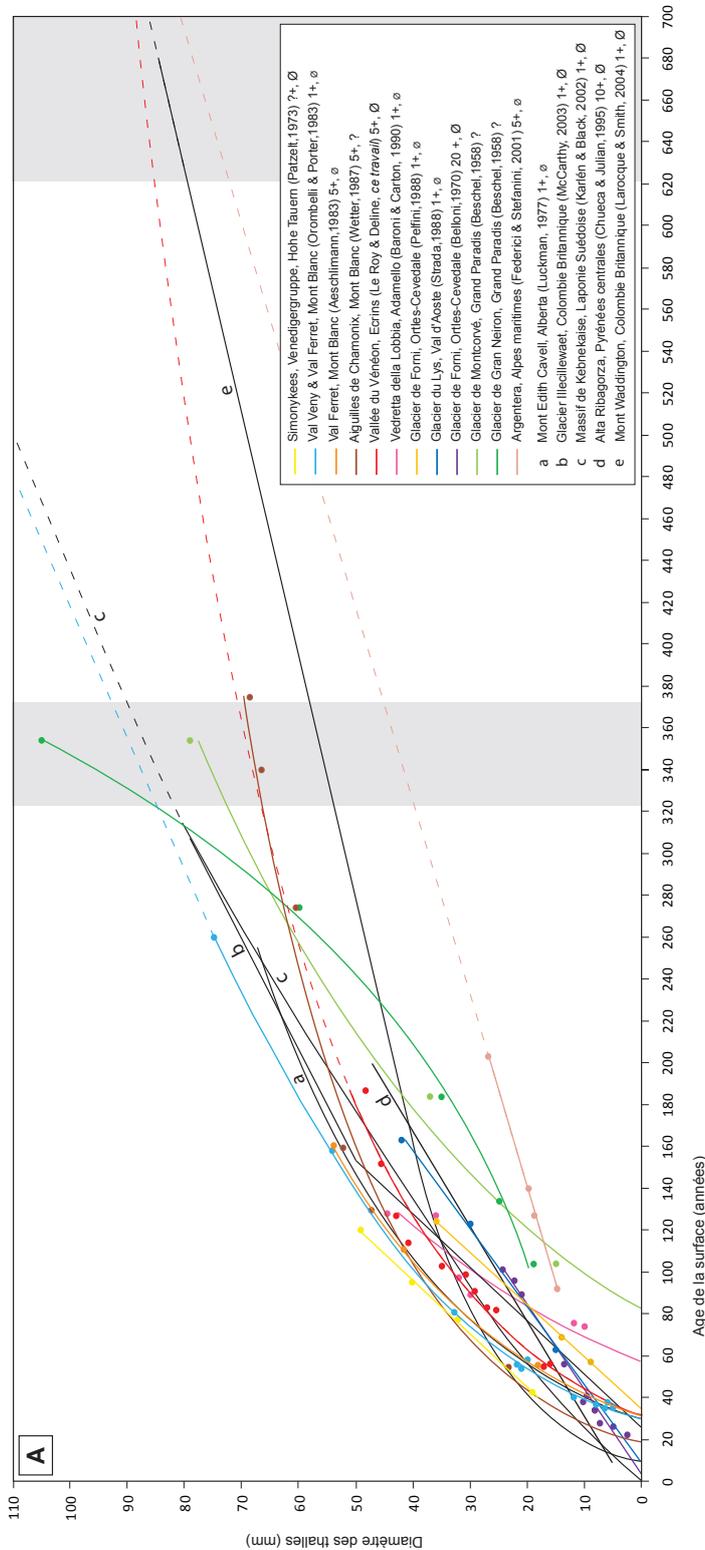


Figure 2 - A : courbes de croissance de *Rhizocarpon geographicum* s.l. dans les Alpes (en couleur), et sélection de courbes de massifs comparables (en noir). Les paramètres de construction de chaque courbe ont été indiqués ($n +$: moyenne des n plus grands thalles par surface ; \emptyset : diamètre maximum ; \circ : diamètre minimum). Bandes grises : âges dérivés pour des diamètres moyens maximaux de 85–90 mm (valeurs mesurées sur les surfaces les plus anciennes de notre terrain d'étude). Ces diamètres indiquent des surfaces datant du XVII^e siècle selon les courbes présentant les taux de croissance les plus élevés, et des XIII^e et XI^e siècles selon les taux de croissance plus modérés.

B : courbes de croissance de cette étude.

C : comparaison des trois courbes de croissance du massif des Ecrins. La bande grisée représente l'intervalle de confiance à 95% sur la régression.

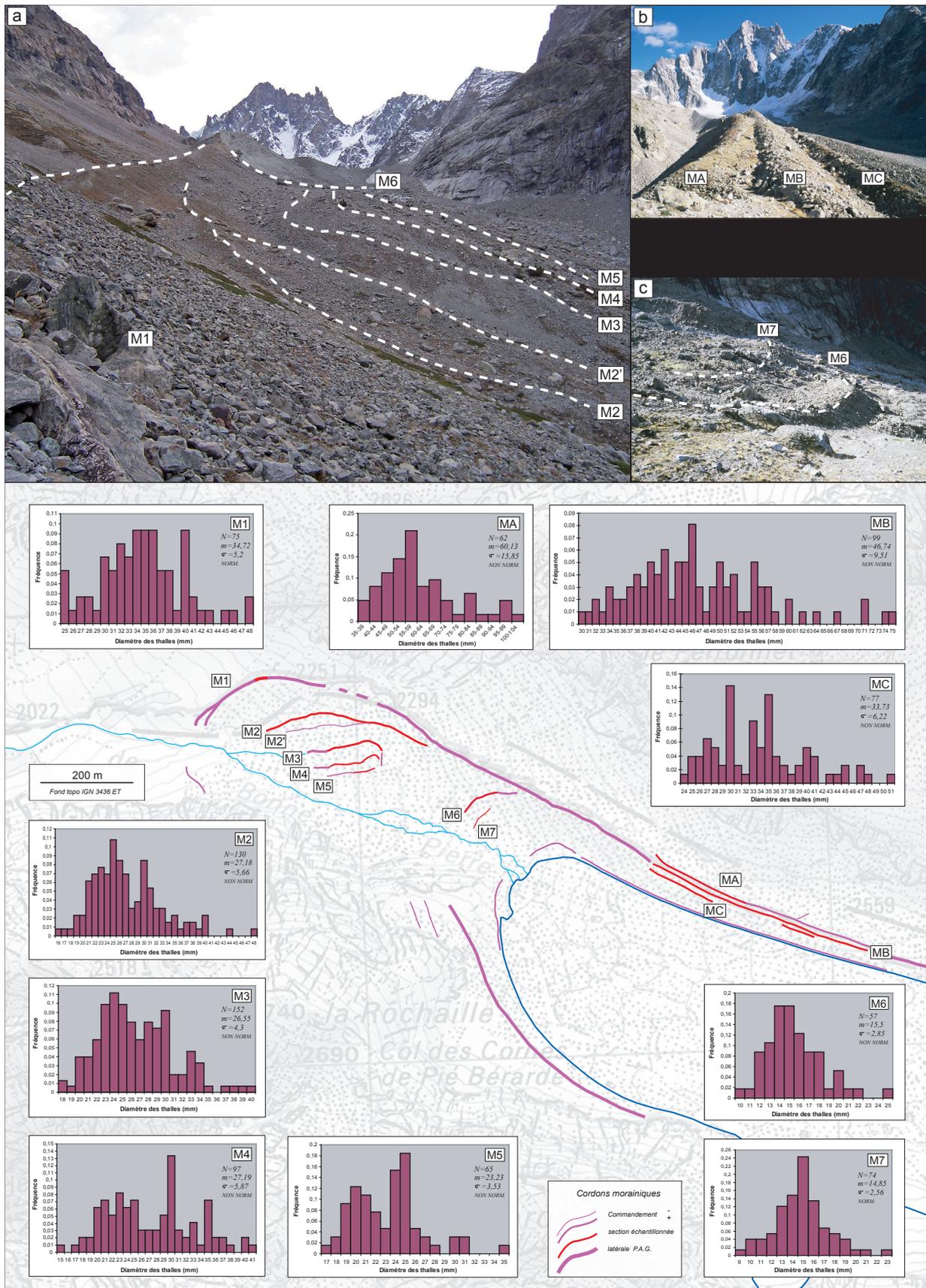


Figure 3 - Vue d'ensemble et cartographie des moraines du PAG dans le vallon de Bonnepierre, avec les paramètres statistiques des mesures lichénométriques pour chaque surface (distribution fréquence/diamètre, taille de l'échantillon (N), moyenne (m), écart-type (σ) et résultat du test de normalité Shapiro-Wilk. La photo (a) est prise vers le SE depuis M1 à 2200 m, la photo (b) est prise vers l'ESE depuis M1 à 2550 m, et la photo (c) est prise vers le S depuis M1 à 2400 m (fond topographique extrait de la carte TOP 25 : 3436 ET. © IGN, Paris 2009 - Autorisation n° 80-9026.)

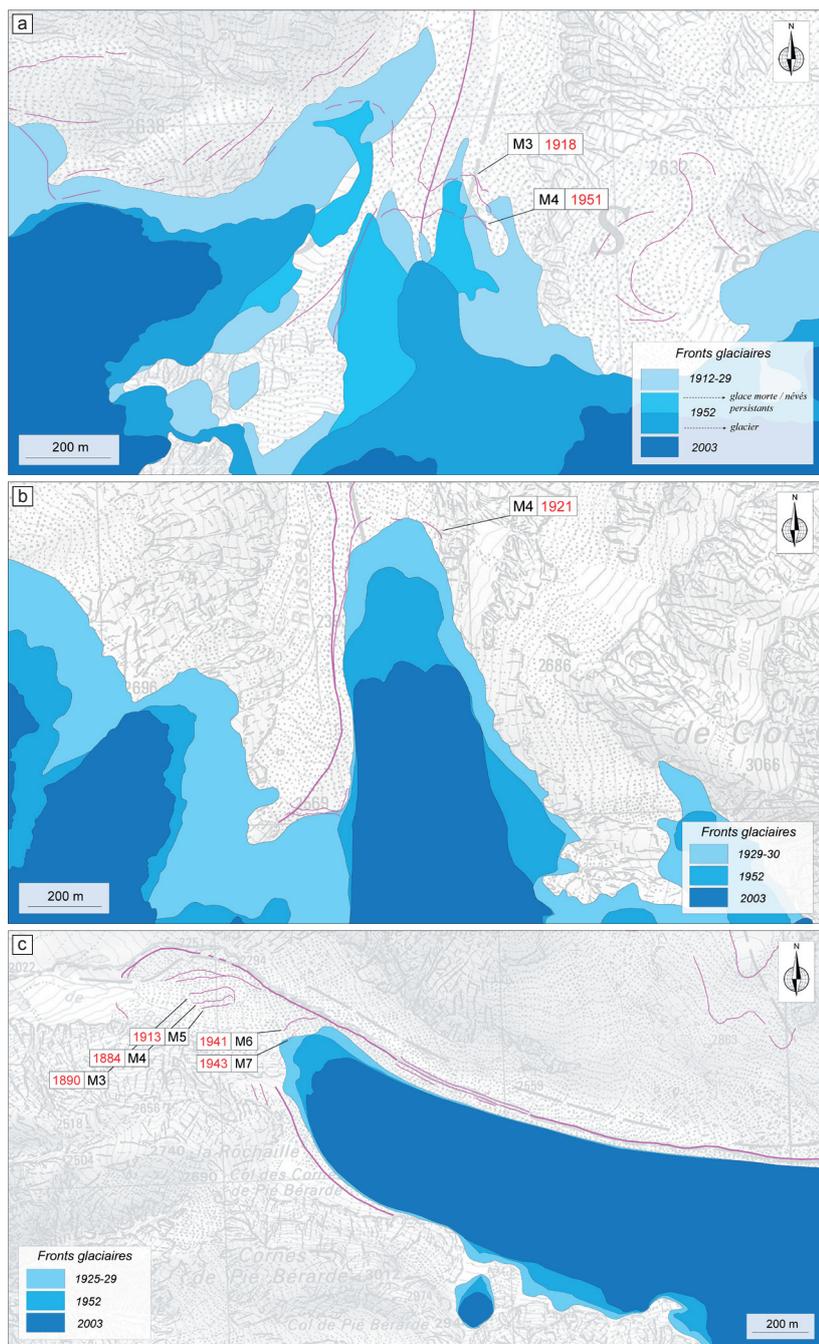


Figure 4 - Datations lichénométriques (courbe 5+) et extensions glaciaires des années 1920, de 1952 et de 2003 pour les vallons de Lanchâtra (a), des Etages (b) et de Bonnepierre (c) (fond topographique extrait de la carte TOP 25 : 3436 ET, © IGN, Paris 2009 - Autorisation n° 80-9026).

dre chronologique des moraines déterminé *a priori* suivant la morphostratigraphie (un dépôt morainique *b* situé à l'amont d'un dépôt *a* est nécessairement plus jeune), sauf pour les cordons M3 et M4 de Bonnepierre, datés respectivement de 1890 et 1884 – un biais lié à l'hétérogénéité des diamètres mesurés en fonction du contexte géomorphologique (les moraines constituées de gros blocs – métriques – portent des thalles plus importants que celles qui sont constituées de blocs de fraction plus fine – centimétrique, décimétrique – liés par une matrice susceptible d'être remobilisée).

1 - Evaluation de la qualité des résultats sur la période récente et implications pour les fluctuations glaciaires du XX^e siècle

Une évaluation de la qualité des dates lichénométriques est possible pour le XX^e siècle, par comparaison avec des cartes topographiques, des photographies anciennes et des aéro-photographies (à partir de 1952). Ces données ont été intégrées à un SIG (Système d'information géographique), pour produire une carte des extensions glaciaires comparées aux cordons morainiques et aux dates obtenues avec la courbe 5+ (figure 4). Les résultats ont également été confrontés aux bilans de masse glaciaires du glacier de Saint-Sorlin (massif des Grandes Rousses) (figure 1A) reconstitués par Vincent (2002) (figure 5).

Les fluctuations glaciaires postérieures au PAG sont assez bien connues puisque l'observation des glaciers débute dans la région à la fin du XIX^e siècle et devient plus continue au début du XX^e siècle (Allix *et al.*, 1927). Ainsi, les glaciers ont atteint un minimum de 1912 à 1916 dans le Vénéon, suivi d'une crue, « particulièrement violente entre 1918 et 1919 » qui se prolonge pendant la décennie 1920 (Allix, 1929). Les datations lichénométriques reflètent le décalage entre les dynamiques glaciaires : la même péjoration climatique entraîne le dépôt des moraines datées (sur la base des 5+) de 1918 à Lanchâtra (M3), 1921 au Vallon des Etages (M4), et 1941 à Bonnepierre (M6). La couverture détritifique de ce glacier, et sa taille plus importante que les autres glaciers étudiés, lisse le forçage climatique. En effet, comme le glacier Blanc (figure 5) le glacier de Bonnepierre a réagi à la péjoration du début du siècle par une seule avancée frontale là où les petits glaciers (Saint-Sorlin, Etages, Lanchâtra) ont réavancé au moins deux fois : à la fin des années 1910 et à la fin des années 1930 (figure 5). Le dépôt de M6 et M7 à Bonnepierre au début des années 1940 est cohérent avec le comportement de ce glacier qui a enregistré une progression du front dans la seconde moitié des années 1910 (Allix *et al.*, 1927), mais n'a pas réagi aux fluctuations mineures des années 1920 et 1930. Son retrait de M6, position occupée depuis 1890, date donc du début des années 1940 en réponse au forçage majeur de cette période (figure 5).

L'incertitude calculée sur les datations intègre à la fois l'intervalle de confiance à 95 % calculé autour de chaque courbe de croissance, l'erreur potentielle liée à la mesure du thalle (1 mm), qui représente *ca.* 2-3 ans dans la phase de forte croissance et une dizaine d'années pour des surfaces de 300 ans (courbe des 5+), et enfin l'écart entre les résultats obtenus avec les différentes courbes, donné par l'écart-type sur les dates (seulement pour les courbes logarithmiques qui constituent la Chronologie B). L'incertitude calculée est donc de $\pm 5-15$ ans sur le XX^e siècle et de $\pm 10-25$ ans sur le XIX^e (tableau 2). Néanmoins, la confrontation aux documents historiques et aux bilans de masse de Saint-Sorlin indique que les datations lichénométriques sur le XX^e siècle peuvent être potentiellement plus précises. La figure 5 montre en effet que les dates obtenues sont comprises dans un intervalle de 5 ans après la fin des bilans positifs du glacier de Saint-Sorlin, lors des deux petites péjorations des années 1910 et 1930, ce qui, pour de petits glaciers aux faibles temps de réponse, correspond bien à la période de dépôt des moraines. La précision observée est donc bonne, comparable à celle avancée par d'autres travaux de ce type (Bickerton et Matthews, 1992 ; O'Neal et Schoenberger, 2003 ; Matthews, 2005). Deux exceptions néanmoins : la sous-estimation des dates dans la marge proglaciaire de Bonnepierre (M3-M5) du fait de l'hétérogénéité du substrat (absence de blocs) (O'Neal, 2006), et à Lanchâtra, où la date de M4 (1951) est trop jeune d'une dizaine d'années car elle ne correspond pas à une période d'avancée glaciaire. Cette erreur est sans doute liée à la faible taille de cette surface (Innes, 1985a).

La méthode des 10+ donne des âges généralement plus jeunes que la courbe 5+, mais avec moins de cinq ans d'écart pour le XX^e siècle, et à peine plus pour le XIX^e siècle. Toutefois, lorsque les plus grands diamètres de thalles sont moins dispersés (ce qui peut être dû à un échantillonnage plus important, mais pas uniquement), la méthode des 10+ donne des dates légèrement antérieures à celle des 5+. Le ratio 10+/5+ renseigne sur le poids des plus grands thalles dans la date obtenue, un écart très important indiquant des thalles anormaux (Innes, 1984b). Enfin, les résultats dérivés du 1+TRI sont assez concordants avec les deux précédentes méthodes pour le XX^e siècle, malgré une plus grande variabilité d'ailleurs décrite dans la littérature (Innes, 1984a) ; en revanche, ils sont très éloignés pour la période antérieure, à cause de la régression linéaire utilisée pour décrire les surfaces les plus anciennes.

2 - Implications pour la chronologie du PAG

Selon la courbe de croissance considérée, on obtient deux chronologies très différentes pour les dépôts anciens (*i.e.* antérieurs à 1850), sans qu'aucune ne soit pleinement satisfaisante faute de s'appuyer sur une calibration locale. La *Chronologie A* (figure 6) est basée sur les dates dérivées de la courbe 1+ TRI, linéaire au-delà de 100 ans (figure 2B). Les âges dérivés des trois autres courbes sont beaucoup plus anciens étant donnée la fonction logarithmique traduisant la baisse de croissance au-delà de 150 ans. Ils constituent la *Chronologie B* (figure 7).

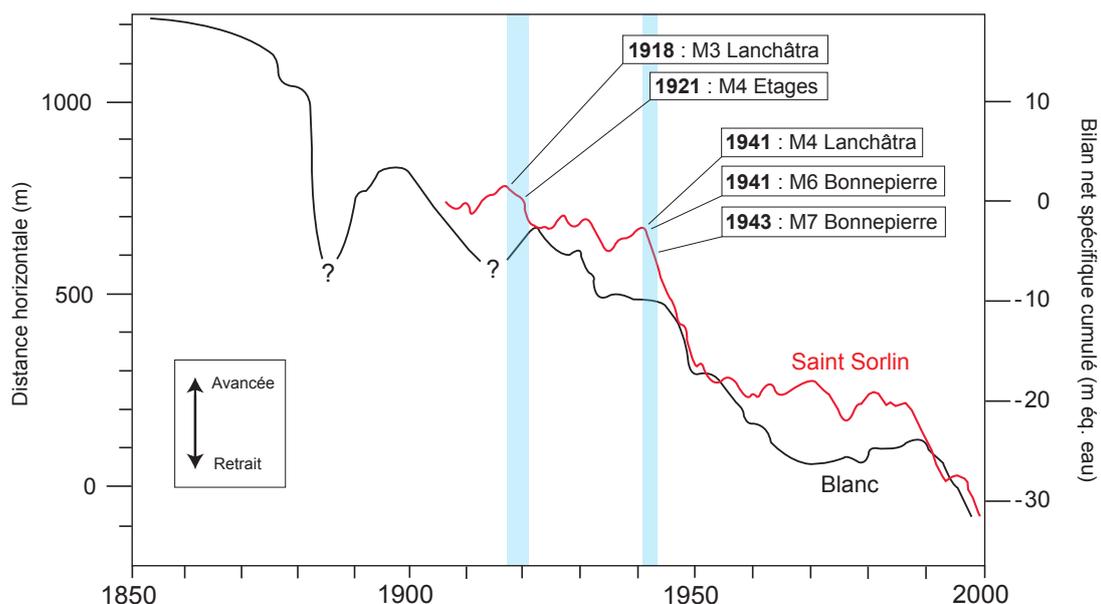


Figure 5 - Variations de longueur du Glacier Blanc depuis la fin du PAG (Reynaud, 1998) et reconstitution des bilans de masse du glacier de Saint-Sorlin depuis 1907 (Vincent, 2002), deux enregistrements indépendants utilisés pour la vérification des dates lichénométriques. Les zones ombrées représentent les périodes de dépôt de moraines au cours du XIX^e siècle sur les marges proglaciaires étudiées. Les dates lichénométriques de stabilisation des moraines coïncident avec le début du retrait du glacier de Saint-Sorlin à la suite des deux récurrences.

a - Chronologie A

D'après cette courbe (figure 6), les surfaces les plus anciennes sont datées du XVII^e siècle et il semble possible de corréliser les dépôts MA de Bonnepierre (1599), M1 des Etages (1636), et potentiellement M1 de Lanchâtra (blocs externes).

A Lanchâtra, les cordons M1 et M2 dateraient respectivement de la décennie 1820 et de ca. 1860 – M2 ne peut dater de 1890 car le glacier est alors bien en retrait de cette position après 35 ans de décrue (Bonaparte, 1891). Le commandement plus important de M1 et la présence de thalles anormalement grands (jusqu'à 85 mm) sur quelques blocs de la face distale, peuvent indiquer que ce cordon, qui marque l'extension maximum du PAG, aurait été atteint plusieurs fois par le glacier, notamment au cours de la seconde moitié du XVII^e siècle (tableau 2, dates de M1' entre parenthèses). Le différentiel de colonisation des lichens caractériserait alors un dépôt diachronique.

Aux Étages, M1 est daté du milieu du XVII^e siècle (tableau 2) et serait contemporain des maxima du PAG de la Mer de Glace (1644), et du glacier du Tour (1640-48) (Bless, 1984 ; Nussbaumer *et al.*, 2007). M2 daterait de la fin du XVIII^e siècle, mais sur la base d'un seul thalle (Ø 63 mm). N'ayant été préservé qu'en rive droite, ce cordon est exposé à l'érosion due aux processus de versant. Il s'agit donc d'un âge minimal. Une crue, reconnue en 1780 dans le massif du Mont Blanc (Nussbaumer *et al.*, 2007), pourrait être contemporaine. Enfin M3, le cordon le plus développé, est daté de 1820, bien que certains tronçons datés indépendamment indiquent ca. 1850 (tableau 2).

A Bonnepierre, les cordons latéraux MA, MB et MC forment le secteur central de la crête de la grande moraine latérale droite (figure 3), vraisemblablement

construite au cours du Néoglaciale. Ils dateraient respectivement du début du XVII^e siècle, de la première moitié du XVIII^e siècle et de la mi-XIX^e siècle. Mais si ces dates sont en accord avec la chronologie classique du PAG alpin, leur état de surface (profil arrondi de MA, sol, végétation) suggère des âges plus anciens. Quant à la marge proglaciaire, sa datation s'avère délicate. En effet, si M1 est daté de 1850 par lichénométrie, et si le front est attesté dans la marge délimitée par M6 dès 1890 sur la base de photographies anciennes (Kilian, 1900), à quelles avancées correspondent les cordons M2 à M5 ? Et ce d'autant que, glacier noir depuis au moins la fin du PAG (Deline, 2005), le front de Bonnepierre n'a connu depuis la fin du XIX^e siècle que des fluctuations de faible amplitude. Il paraît donc improbable que M1 corresponde à la position de 1850. A moins que les dépôts M2-M5 ne soient le résultat de la fusion de lentilles de glace morte laissées par le glacier dans une période de retrait très rapide comme le suggèrent les reculs importants d'autres glaciers du massif sur la période (Edouard, 1994 ; Reynaud, 1998). Cette hypothèse pourrait expliquer la sous-estimation des dates car de telles surfaces se stabilisent lentement (Innes, 1985a).

La Chronologie A peut être rapprochée du scénario PAG dégagé par Tessier *et al.* (1986) à partir de l'analyse palynologique des sédiments du lac des Bêches, dans le vallon de la Lavey (figure 1 B), qui identifie trois phases de crue glaciaire centrées sur 1545, 1685 (la principale) et 1820.

b - Chronologie B

Etant donné le degré d'incertitude sur la forme de la courbe de croissance au-delà du XIX^e siècle (figure 7), on ne peut exclure que les datations dérivées du 4 TRI

	Bonnepierre									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	MA	MB	MC
"5 +"	1850 ± 14	1869 ± 12	1890 ± 10	1884 ± 10	1913 ± 7	1941 ± 5	1943 ± 5	1081 ± 130	1619 ± 45	1841 ± 15
"10 +"	1853 ± 15	1871 ± 13	1890 ± 10	1883 ± 11	1916 ± 8	1941 ± 5	1943 ± 5	1189 ± 124	1652 ± 44	1845 ± 16
"5+ MDG"	1854 ± 12	1872 ± 10	1891 ± 8	1885 ± 9	1913 ± 6	1940 ± 3	1942 ± 3	1178 ± 136	1645 ± 44	1846 ± 13
"1 + TRI"	1856 ± 23	1856 ± 23	1893 ± 20	1889 ± 20	1904 ± 14	1937 ± 13	1942 ± 8	1599 ± 46	1730 ± 34	1842 ± 24

	Etages						Lanchâtra			
	M1	M2	M3	M3 (R.D.)	M3 (R.G.)	M4	M1 (M1')	M2	M3	M4
"5 +"	1300 ± 91	1810 ± 19	1825 ± 17	1848 ± 14	1842 ± 15	1921 ± 7	1840 ± 16 (1661 ± 39)	1867 ± 13	1918 ± 7	1951 ± 4
"10 +"	1329 ± 93	1821 ± 19	1832 ± 18	1854 ± 14	1846 ± 15	1920 ± 7	1845 ± 16	1861 ± 14	1920 ± 7	1952 ± 4
"5+ MDG"	1365 ± 94	1818 ± 18	1831 ± 16	1852 ± 13	1847 ± 13	1921 ± 5	1845 ± 14 (1682 ± 39)	1870 ± 12	1918 ± 6	1950 ± 3
"1 + TRI"	1636 ± 43	1786 ± 29	1823 ± 25	1847 ± 23	1823 ± 26	1922 ± 11	1823 ± 25 (1683 ± 34)	1865 ± 22	1912 ± 13	1953 ± 6

Tableau 2 - Datations lichénométriques effectuées sur les trois marges proglaciaires étudiées dans la vallée du Vénéon. L'intervalle accompagnant les dates représente l'incertitude qui leur est associée. Il intègre l'intervalle de confiance à 95 % sur la régression utilisée pour le calcul de la courbe de croissance, et l'incertitude liée à la mesure.

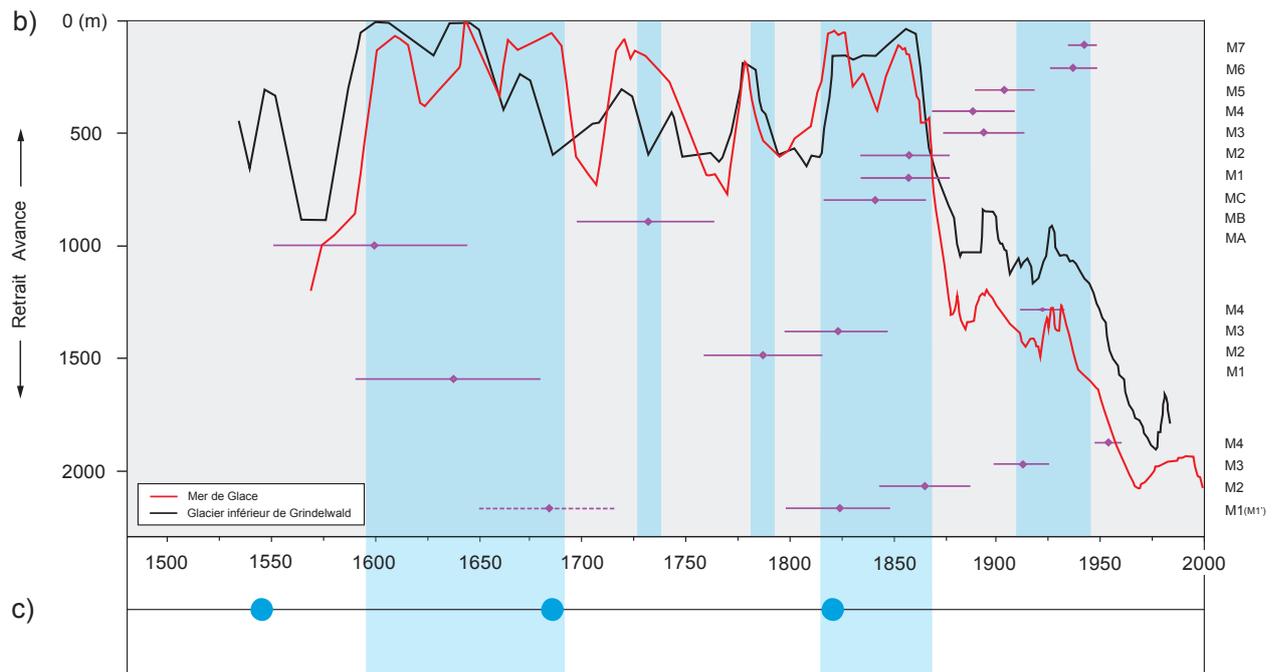


Figure 6 - Chronologie A : (a) datations lichénométriques dérivées de la courbe de croissance 1+ TRI sur les trois marges proglaciaires étudiées, accompagnées de leur marge d'erreur ; (b) fluctuations du front de la Mer de Glace et du glacier inférieur de Grindelwald depuis le XVI^e siècle (Nussbaumer et al., 2007) ; (c) Récurrences PAG du glacier du Lac des Bêches (Haut Vénéon) déterminées par analyse palynologique (Tessier et al., 1986)

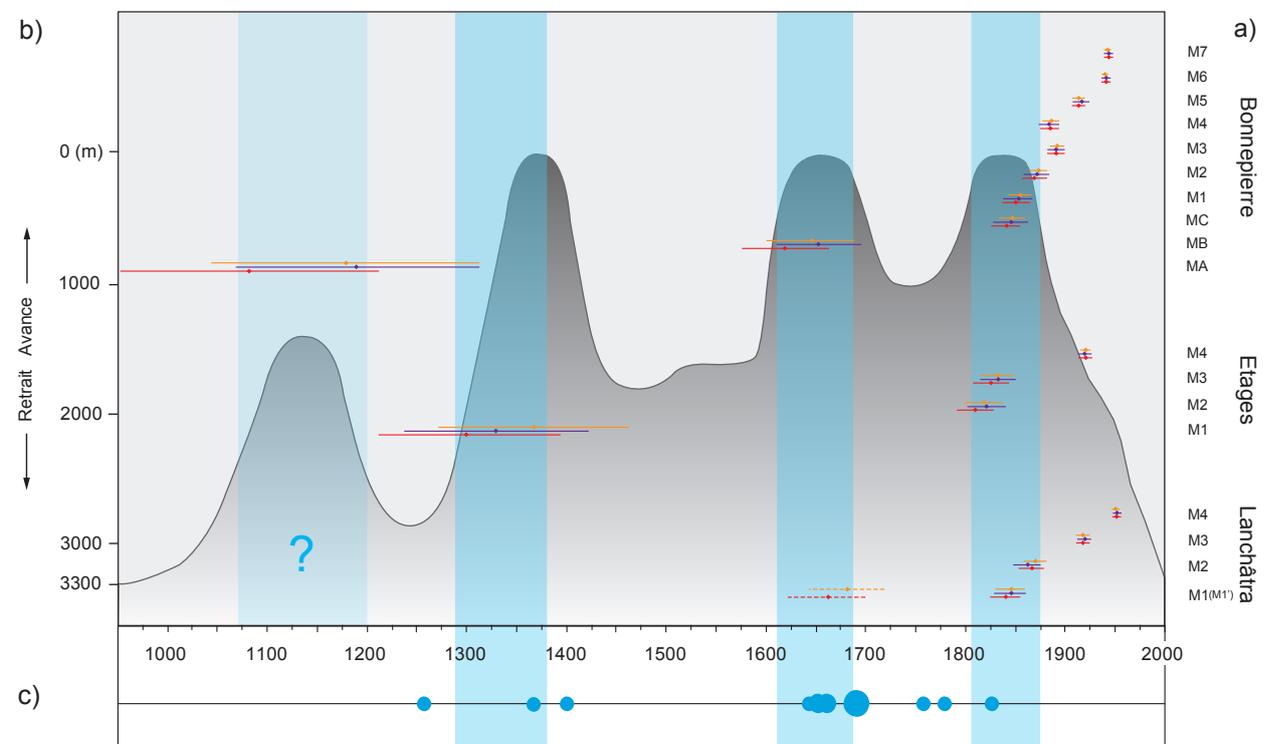


Figure 7 - Chronologie B : (a) datation lichénométriques dérivées des courbes de croissance 5+ (rouge), 10+ (bleu) et 5+ MDG (orange) sur les trois marges proglaciaires étudiées, accompagnées de leur marge d'erreur ; (b) fluctuations du glacier d'Aletsch sur le dernier millénaire (Holzhauser et al., 2005) ; (c) moraines du PAG datées par lichénométrie dans le Val Gesso (massif de l'Argentera, Alpes maritimes italiennes) (Federici et Stefanini, 2001).

sous-estiment largement l'âge des moraines. En effet, le ralentissement de la croissance observé après un siècle sur la courbe 5+ s'accorde mal avec le point de contrôle du Triolet qui paraît trop jeune. Dans ce cas, selon l'extrapolation des courbes 5+, 10+ et 5+ MDG (figure 2 B), les cordons MA de Bonnepierre et M1 des Étages témoigneraient d'une, voire de deux avancées aux XII^e, XIII^e et/ou XIV^e siècles (figure 7). Ces avancées pourraient correspondre à la récurrence *Early PAG* bien documentée pour certains grands glaciers suisses (Grove, 2001 ; Holzhauser *et al.*, 2005). Cette hypothèse signifierait que les glaciers étudiés n'auraient pas ré-atteint leurs maxima PAG frontaux (Étages) ou latéraux (Bonnepierre) par la suite (sauf dans le vallon de Lanchâtra). La moraine MB de Bonnepierre daterait de la mi-XVII^e siècle (récurrence qui pourrait être enregistré aussi sur le cordon M1 de Lanchâtra), et MC daterait de la mi-XIX^e siècle, comme dans la chronologie A (tableau 2). La morphologie de MA (profil arrondi, faible fréquence de blocs sur la crête) et la présence d'un sol avec pelouse traduisent l'ancienneté du dépôt, certainement antérieur à la seconde moitié du PAG – période qui serait caractérisée ici par la structure *open-work* des moraines (*e.g.* MB, MC)

Cette chronologie B est également confortée par un parallèle avec d'autres travaux menés dans les Alpes Maritimes (Federici et Stefanini, 2001), le massif du Mont Blanc (Bless, 1984) ou en Colombie Britannique (Larocque et Smith, 2004). La différence de croissance

des thalles sur le long terme (figure 2A), en comparaison des courbes d'Orombelli et Porter (1983) ou de Karlén et Black (2002), est importante et souligne la nécessité de prolonger la calibration à proximité du terrain d'étude, quand cela est possible, pour réduire les incertitudes.

La lichénométrie pourrait également sous-estimer l'âge des surfaces anciennes, faute de prendre en compte le renouvellement générationnel des lichens. Deline (1997) relève ainsi un thalle de 130 mm sur une moraine de l'amphithéâtre morainique du lac du Miage (massif du Mont Blanc), indiquant un âge de *ca.* 1400 AD selon l'extrapolation de la courbe d'Orombelli et Porter (1983), alors que la datation ¹⁴C de la moraine est 2750-2350 cal BP (Deline et Orombelli, 2005). L'hypothèse d'un renouvellement de génération et de la présence de cohortes différentes est étayée par une modélisation de la croissance de *Rhizocarpon geographicum* (L.) DC. (Loso et Doak, 2005) selon laquelle ce lichen subirait une mortalité importante (2-3 % par an) qui entraînerait la quasi-absence des premiers colonisateurs sur les surfaces les plus vieilles. La faible probabilité de trouver de vieux thalles sur les surfaces anciennes induirait la forme convexe des courbes de croissance. Pour d'autres auteurs, le ralentissement qui suit la période de *great growth* serait caractéristique de cette espèce, et une fonction du diamètre – donc de l'âge – du thalle (Bradwell et Armstrong, 2007).

CONCLUSION

L'utilisation de la lichénométrie pour dater des moraines du PAG et post-PAG dans le massif des Ecrins a mis en évidence :

- la possibilité, en employant une méthode simple, de dater de manière relativement précise – \pm 5-25 ans (voire moins) – des dépôts stabilisés depuis le début du XIX^e siècle ;
- la datation de surfaces plus anciennes que la dernière crue du PAG (*ca.* 1850) dans les trois marges proglaciaires étudiées. Leurs âges exacts demeurent cependant incertains, du fait de l'absence de points de contrôle locaux anciens et d'incertitudes concernant la méthode elle-même. Trois hypothèses peuvent être formulées sur leur âge maximal : XVII^e siècle (chronologie A), XII-XIV^e siècles (chronologie B), voire récurrence néoglaciale plus ancienne (Göschenen II ?) si

l'on prend en compte un possible renouvellement générationnel des lichens ;

- le fait que la lichénométrie ne semble utilisable dans les Alpes que pour dater, au mieux et difficilement, l'ensemble du PAG, étant donné la coalescence des thalles affectant les surfaces les plus anciennes ;
- la nécessité de mieux connaître la structure et la dynamique des populations anciennes de lichens pour évaluer la forme de la courbe de croissance à long terme. Pour cela le suivi d'un échantillon de lichens sur plusieurs années permet d'évaluer la croissance relative selon le diamètre du thalle (Bradwell et Armstrong, 2007), et d'évaluer son ralentissement. Un tel suivi a été mis en place en 2008 dans la vallée du Vénéon.

Remerciements

Nous remercions les personnels du Musée Dauphinois, des Archives Départementales de l'Isère et du Centre de documentation du Parc National des Ecrins pour avoir facilité la recherche documentaire. Merci également à M. Couteaux et à D. Roche pour le partage de leur connaissance du terrain, et à N. Jacob et A. Rabatel pour leur relecture et les suggestions qui ont enrichi ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- AESCHLIMANN H., 1983. Zur Gletschergeschichte des italienischen Mont Blanc Gebietes : Val Veni - Val Ferret - Ruitor. Thèse de Doctorat, Université de Zürich, 106 p.
- ALLIX A., BENEVENT E., BLANCHARD R., FLUSIN G., GIGNOUX M., JACOB C., 1927. Observations glaciologiques faites en Dauphiné jusqu'en 1924, récapitulées et partiellement éditées. *Études Glaciologiques*, tome 6, Ministère de l'Agriculture, 1-141.
- ALLIX A., 1929. Un pays de haute montagne : l'Oisans, étude géographique. A. Collin, Paris, 915 p.
- ANDRE M.F., 1993. Les versants du Spitzberg, approche géographique des paysages polaires. Presses Universitaires de Nancy, 361 p.
- AZNAVOUR A., 1999. Les fluctuations glaciaires sur la rive droite de la vallée du Vénéon. Mémoire de Maîtrise, Université de Grenoble, IGA, 112 p.
- BARFETY J.C., PECHER A., BAMBIER A., DEMEULEMESTER P., FOURNEAUX J.P., POULAIN P.A., VERNET J., VIVIER G., 1984. Notice de la carte géologique, Feuille de Saint Christophe en Oisans. Ed. du BRGM, Orléans, 64 p.
- BARONI C., CARTON A., 1990. Variazioni oloceniche della Vedretta della Lobbia (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali). *Geografia Fisica e dinamica Quaternaria*, 13, 105-119.
- BELLONI S., 1970. Nota preliminare sulle ricerche lichenometriche nell'alveo vallivo del Ghiacciaio dei Forni. *Bolletino Comitato Glaciologico Italiano*, 18, 43-50.
- BESCHEL R.E., 1950. Flechten als Altersmaßstab rezenter Moränen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, N.F.1, 152-161. (Traduction de W. Barr : Lichens as a measure of the age of recent moraines. *Arctic and Alpine Research*, 5, 4, 303-309).
- BESCHEL R.E., 1957. Lichenometrie im Gletschervorfeld. *Jahrbuch des Vereins zum Schutze der Alpenpflanzen und Alpentiere*, 22, 164-185.
- BESCHEL R.E., 1958. Ricerche lichenometriche sulle morene del gruppo del Gran Paradiso. *Nuovo Giornale Botanico Italiano*, 65, 3, 538-591.
- BICKERTON R.W., MATTHEWS J.A., 1992. On the accuracy of lichenometric dates : an assessment based on the "Little Ice Age" moraine sequence of Nigardsbreen, southern Norway. *The Holocene*, 2, 3, 227-237.
- BLESS R., 1984. Beiträge zur Spät- und Post-glazialen geschichte der gletscher im Nordöstlichen Mont Blanc Gebiet. Thèse de Doctorat, Université de Zürich, 116 p.
- BONAPARTE R., 1890. Les variations périodiques des glaciers français. *Annuaire du Club Alpin Français*, 17^e vol.
- BONAPARTE R., 1891. Les variations périodiques des glaciers français. *Annuaire du Club Alpin Français*, 18^e vol.
- BOURGEAT S., 1990. Eboulements et écroulements dans le bassin versant du Vénéon. *Revue de Géographie Alpine*, 1-2-3, 78, 11-24.
- BRADWELL T., ARMSTRONG R.A., 2007. Growth rates of *Rhizocarpon geographicum* lichens : a review with new data from Iceland. *Journal of Quaternary Science*, 22, 4, 311-320.
- CHUECA J., JULIÁN A., 1995. Datacion de depositos de derrubios gravitatorios a partir de tecnicas liquenometricas (Alta Ribagorza, Pireneo oriental oscense). *Lucas Mallada* 7, 115-145.
- COSSART E., 2005. Evolution géomorphologique du haut bassin durancien (Alpes du Sud, France) depuis la dernière glaciation : contribution à la compréhension du fonctionnement du système paraglaciare. Thèse de doctorat, Université Paris 7 - Denis Diderot, 389 p.
- COSSART E., FORT M., JOMELLI V., GRANCHER D., 2006. Les variations glaciaires en Haute Durance (Briançonnais, Hautes-Alpes) depuis la fin du XIX^e siècle : mise au point d'après les documents d'archives et la lichénométrie. *Quaternaire*, 17, 1, 75-92.
- COÛTEAUX M., 1982. Recherches palynologiques dans le Haut-Oisans. Rapport de recherches au Parc National des Ecrins, 57 p.
- DELINE P., 1997. Les variations holocènes récentes du Glacier du Miage (Val Veny) : contribution à la prévision du risque glaciaire. Mémoire de DEA, Université de Savoie, 62 p.
- DELINE P., 2005. Change in surface debris cover on Mont Blanc massif glaciers after the "Little Ice Age" termination. *The Holocene*, 15, 2, 302-309.
- DELINE P., OROMBELLI G., 2005. Glacier fluctuations in the western Alps during the Neoglacial as indicated by the Miage morainic amphitheatre (Mont Blanc massif, Italy). *Boreas* 34, 1-12.
- DENTON G.H., KARLÉN W., 1973. Holocene climatic variations - their pattern and possible cause. *Quaternary Research*, 3, 155-205.
- EDOUARD J.L., 1978. *La glaciation du bassin de la Romanche, contribution à l'étude des fluctuations glaciaires post-würmiennes*. Thèse de 3^e cycle, I.G.A., 329 p.
- EDOUARD J.L., 1994. Les lacs d'altitude dans les Alpes françaises, Contribution à la connaissance des lacs d'altitude et à l'histoire des milieux montagnards depuis la fin du Tardiglaciaire. Thèse d'Etat, Grenoble, 795 p.
- FEDERICI P.R., STEFANINI M.C., 2001. Evidence and chronology of the Little Ice Age in the Argentera massif (Italian Maritime Alps). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 37, 1, 35-48.
- GALLO L.M., PIERVITTORI R., 1993. Lichenometry as a method for holocene dating : limits in its applications and reliability. *Il Quaternario*, 6, 1, 77-86.
- GROVE J.M., 2001. The initiation of the Little Ice Age in regions round the North Atlantic. *Climatic Change*, 48, 53-82.
- HOLZHAUSER H., MAGNY M., ZUMBÜHL H.J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15, 6, 789-801.
- INNES J.L., 1982. Lichenometric use of an aggregated *Rhizocarpon* "species". *Boreas*, 11, 53-57.
- INNES J.L., 1984a. The optimal sample size in lichenometric studies. *Arctic and Alpine Research*, 16, 2, 233-244.
- INNES J.L., 1984b. Lichenometric dating of moraine ridges in northern Norway: some problems of application. *Geografiska Annaler*, 66 A, 4, 341-352.
- INNES J.L., 1985a. Lichenometry. *Progress in Physical Geography*, 9, 187-254.

- INNES J.L., 1985b. Moisture availability and lichen growth : the effects of snow cover and streams on lichenometric measurements. *Arctic and Alpine Research*, 17, 4, 417-424.
- JACOB C., FLUSIN G., 1905. Etude sur le glacier Noir et le glacier Blanc dans le massif du Pelvoux, rapport sur les observations rassemblées en août 1904 dans les Alpes du Dauphiné. Extrait de l'*Annuaire de la S.T.D.*, 30, Allier, Grenoble, 62 p.
- JOCHIMSEN M., 1966. Ist die Grösse des Flechtenthallus wirklich ein brauchbarer Masstab zur Datierung von glazialgeomorphologischen Relikten. *Geografiska Annaler* 48A, 3, 157-164 (Traduction de W. Barr et M. Jochimsen : Does the size of lichen thalli really constitute a valid measure for dating glacial deposits ? *Arctic and Alpine Research*, 5, 4, 417-424).
- JOMELLI V., PECH P., 2004. Effects of the Little Ice Age on avalanche boulder tongues in the French Alps (Massif des Ecrins). *Earth Surface Process and Landforms*, 29, 553-564.
- KARLÉN W., BLACK J.L., 2002. Estimates of lichen growth-rate in northern Sweden. *Geografiska Annaler*, 84 A, 3-4, 225-232.
- KILIAN W., 1900. Observations sur les variations des glaciers et l'enneigement dans les Alpes dauphinoises de 1890 à 1899. Allier, Grenoble, 231 p.
- LAGIER T., MASSON S., 1997. Les glaciers de la Vallouise (glacier Blanc / glacier Noir), héritages holocène et évolution climatique. Mémoire de Maîtrise, Université d'Aix en Provence, 86 p.
- LAROCQUE S.J., SMITH D.J., 2004. Calibrated *Rhizocarpon* spp. growth curve for the Mount Waddington area, British Columbia Coast Mountains, Canada. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36, 4, 407-418.
- LE ROY M., 2006. Fluctuations glaciaires sur la rive gauche du Haut Vénéon depuis la fin du Petit Age de Glace. Mémoire de Master 1, Université de Savoie, 160 p.
- LOSO M.G., DOAK D.F., 2005. The biology behind lichenometric dating curves. *Oecologia*, 147, 2, 223-229.
- LUCKMAN B.H., 1977. Lichenometric dating of holocene moraines at Mount Edith Cavell, Jasper, Alberta. *Canadian Journal of Earth Science*, 14, 1809-1822.
- MATTHEWS J.A., 2005. "Little Ice Age" glacier variations in Jotunheimen, Southern Norway : a study in regionally controlled lichenometric dating of recessional moraines with implications for climate and lichen growth rates. *The Holocene*, 15, 1, 1-19.
- MCCARTHY D.P., 2003. Estimating lichenometric ages by direct and indirect measurement of radial growth: a case study of *Rhizocarpon* agg. at the Illecillewaet glacier, British Columbia, Arctic. *Antarctic and Alpine Research*, 35, 2, 203-213.
- MILTENBURG J., 1986. Verkenning naar de trepasbaaheid van lichenometrie in de Franse Alpen. MSc report, Faculté de Géographie, Université d'Utrecht, 30 p.
- NAVEAU P., JOMELLI V., COOLEY D., GRANCHER D., RABATEL A., 2007. Modeling uncertainties in lichenometry studies with an application : The Tropical Andes (Charquini Glacier in Bolivia). *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39, 2, 277-285.
- NUSSBAUMER S.U., ZUMBÜHL H.J., STEINER D., 2007. Fluctuations of the Mer de Glace (Mont Blanc area, France) AD 1500-2050. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 40 (2005-2006), 5-175.
- O'NEAL M.A., 2006. The effects of slope degradation on lichenometric dating of Little Ice Age moraines. *Quaternary Geochronology*, 1, 121-128.
- O'NEAL M.A., SCHOENENBERGER K.R., 2003. A *Rhizocarpon geographicum* growth curve for the Cascade Range of Washington and northern Oregon, U.S.A. *Quaternary Research*, 60, 233-241.
- OROMBELLI G., PORTER S.C., 1983. Lichen growth curves for the southern flanks of the Mont-Blanc Massif, Western Italian Alps. *Arctic and Alpine Research*, 15, 2, 193-200.
- PATZELT G., 1973. Die neuzeitlichen gletscherschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9, 1-2, 5-57.
- PECH P., JOMELLI V., BAUMGART-KOTARBA M., BRAVARD J.P., CHARDON M., JACOB N., KEDZIA S., KOTARBA A., RACZKOWSKA Z., TSAO C., 2003. A lichenometric growth curve in the French Alps: Ailefroide and Veneon valleys, Massif des Ecrins. *Geodinamica Acta*, 16, 187-193.
- PELFINI M., 1988. Contributo alla conoscenza delle fluttuazioni oloceniche del Ghiacciaio dei Forni (Gruppo Ortles-Cevedale, Sondrio). *Natura Bresciana*, 24, 237-257.
- POELT J., 1988. *Rhizocarpon* Ram. Em. Th. Fr. Subgen. *Rhizocarpon* in Europe. *Arctic and Alpine Research*, 20, 3, 292-298.
- PROCTOR M.C.F., 1983. Sizes and growth-rates of thalli of the lichen *Rhizocarpon Geographicum* on the moraines of the Glacier de Valsorey, Valais, Switzerland. *Lichenologist*, 15, 3, 249-261.
- RABATEL A., JOMELLI V., NAVEAU P., FRANCOU B., GRANCHER D., 2005. Dating of Little Ice Age glacier fluctuations in the tropical Andes : Charquini glaciers, Bolivia, 16°S. *C.R. Geoscience*, 337, 1311-1322.
- REYNAUD L., 1998. Suivis glaciologiques dans les Ecrins. Rapport au Parc National des Ecrins, 36 p.
- SAINT-ROMME, 1893. L'Oisans et la Bérarde, huit jours dans les glaciers. Imprimerie Charles Blot, Paris, 56 p.
- STRADA E., 1988. Le variazioni del Ghiacciaio del Lys dalla "Piccola Glaciazione" ai nostril giorni. *Natura Bresciana*, 24, 275-288.
- TESSIER L., COÛTEAUX M., GUIOT J., 1986. An attempt at an absolute dating of a sediment from the last glacial recurrence through correlations between pollenanalytical and tree-ring data. *Pollen et Spores*, 28, 1, 61-76.
- VINCENT C., 2002. Influence of climate change over the 20th century on four french glacier mass balances. *Journal of Geophysical Research*, 107, D19, 4375, doi:10.1029/2001JD000832.
- WETTER W.K., 1987. Spät- und Postglaziale gletscherschwankungen im Mont Blanc Gebiet : Untere Vallee de Chamonix - Val Montjoie. Thèse de Doctorat, Université de Zürich, 270 p.
- WINKLER S., 2004. Lichenometric dating of the "Little Ice Age" maximum in Mt Cook National Park, Southern Alps, New Zealand. *The Holocene*, 14, 6, 911-920.
- ZUMBÜHL H.J., HOLZHAUSER H., 1988. Glaciers des Alpes du Petit Age Glaciaire. *Les Alpes*, 64, 129-322.

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques

Sommaire

Editorial
Introduction

1 - Reconstitution

- Coutterand S. *et al.* - Le lobe glaciaire lyonnais au maximum würmien : glacier du Rhône ou/et glaciers savoyards ?
- Ravel L. *et al.* - Désenglacement du haut bassin versant du Vorz (massif de Belledonne, Isère), au Tardiglaciaire et à l'Holocène.
- Rey P.-J. - Sociétés et fluctuations du climat dans les Alpes nord-occidentales au Néolithique moyen.
- Le Roy *et al.* - Étude des fluctuations glaciaires du Petit Âge de Glace dans le Massif des Écrins : apports de la lichénométrie.
- Kirkbride M.P. - Datation des moraines holocènes d'Islande par tephrochronologie : un état de l'art.
- Le Roy *et al.* - La dendroglaciologie, ou l'apport de l'étude des cernes d'arbres pour la reconstitution des fluctuations glaciaires holocènes.
- Rabatel A. - Évolution glaciaire dans les andes subtropicales chiliennes entre 1955 et 2007 : conséquences pour la ressource en eau.
- Le Roy *et al.* - Un inventaire des aérographies du massif du Mont Blanc.

2 - Dynamique

- Ravel L. - Évolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel de réchauffement climatique.
- Gruber S. - Le permafrost de haute montagne.
- Deline P. *et al.* - L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc) : un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude.
- Saulnier G.-M. *et al.* - Un éléphant volant est-il un oiseau ? Perspectives pour l'observation hydrométéorologique des milieux de montagne.
- Jobard S. - L'instrumentation du glacier du Baounet : quels apports pour la traçabilité des mesures environnementales ?
- Moreau L. - L'exploration du cryokarst glaciaire et son intérêt scientifique pour l'étude du drainage des eaux de fonte.
- Mazué R. *et al.* - Suivi de l'évolution de la couverture detritique d'un glacier noir par photo-comparaison : le glacier d'Estelette.

3 - Pratiques

- Paccard P. - Réchauffement climatique et ressource neige en domaines skiables.
- Gauchon C. - Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver : un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée.
- Laslaz L. - L'exclusion des glaciers des zones centrales des Parcs nationaux de la Vanoise et des Écrins et leur équipement pour le ski d'été.
- Cayla N. - Les sentiers d'interprétation glaciaire : des outils de valorisation différenciée des glaciers et de leur territoire.
- Lambert R. - Cartozonage : de la carte au zonage du risque avalanche.
- Moulin A. *et al.* - L'incertitude liée aux avalanches dans les Alpes du Nord : identifications et implications pour la gestion.

La «Collection Edytem»
a pour objet de mettre en avant
l'apport de la géographie, de la géologie
et des sciences de l'environnement
dans l'étude des milieux et territoires
de montagne.

Déclinée en «numéros thématiques», elle
met en avant les travaux réalisés au sein
du laboratoire Edytem et les résultats
de ses programmes et actions
de recherche.



Prix - 15 euros

ISBN 978-2-918435-00-6

