

Datation relative de formes périglaciaires alpines à l'aide de la méthode paléogéographique et du marteau de Schmidt

Cristian Scapozza
Christophe Lambiel
Emmanuel Reynard

Institut de Géographie
Université de Lausanne
Anthropole
CH - 1015 Lausanne

E-mails :
cristian.scapozza@unil.ch
christophe.lambiel@unil.ch
emmanuel.reynard@unil.ch

In Lambiel C., Reynard E. et Scapozza C. (Eds) (2011). *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie*, 3-5 septembre 2009, Olivone (Géovisions n° 36). Institut de géographie, Université de Lausanne.

Résumé

L'utilisation conjointe de la méthode paléogéographique et du marteau de Schmidt permet de préciser la chronologie de l'évolution du relief à partir du dernier maximum glaciaire. Dans la région du Mont Gelé (Valais), l'application conjointe des deux méthodes a permis d'établir une chronologie du retrait glaciaire au Tardiglaciaire et de dater les glaciers rocheux dans le secteur de La Chaux et dans le vallon situé à l'est du Mont Gelé. Ceci a permis d'affiner la chronologie de l'évolution morphologique de la région sur plus de 15'000 ans.

Abstract

The joint utilisation of the palaeogeographical method and of the Schmidt hammer allowed giving a more precise chronological scale in studies concerning the Alpine morphogenesis since the Last glacial maximum. In the Mont Gelé area (Valais), the joint application of both methods allowed us to establish a chronology of the Lateglacial glacier retreat and to date rockglaciers in the zone of La Chaux and in the eastern flank of Mont Gelé. The utilisation of these two methods allowed us to refine the chronology of regional morphological evolution of more than 15'000 years.

1. Introduction

Dans le cadre des recherches relatives à l'évolution morpho-climatique des Alpes durant le Tardiglaciaire et l'Holocène, peu d'études ont été menés sur la chrono-stratigraphie des formations sédimentaires meubles de la zone périglaciaire. Celle-ci se situant au-dessus de la limite supérieure de la forêt, il est en effet très difficile de trouver des restes d'origine organique permettant des datations afin d'effectuer des calages chronologiques absolus (Scapozza et al., 2010). De plus, les méthodes permettant de connaître l'âge d'exposition des roches sont relativement complexes et chères. Elles ne permettent donc qu'un nombre limité de datations (par ex. Ivy-Ochs et Kober, 2008). Pour pallier à ce problème, il a été décidé de recourir à des méthodes de datation relative permettant des corrélations avec une chronologie absolue (Haeberli et al., 2003).

Deux types de méthodes ont été utilisées : la méthode dite paléogéographique, permettant la reconstitution de l'extension passée des glaciers et du pergélisol et le calcul de paramètres paléoclimatiques (par ex. Kerschner, 1985; Lambiel et Reynard, 2003), et le marteau de Schmidt (*Schmidt hammer*), permettant la datation relative de la surface de glaciers rocheux, d'éboulis et de moraines (par ex. Shakesby et al., 2006; Kellerer-Pirklbauer, 2008). La méthode paléogéographique permet un calage chronologique absolu par corrélation avec des périodes froides ou chaudes datées par des méthodes numériques (par ex., le radiocarbone, les isotopes cosmogéniques, la luminescence, ...), tandis que le marteau de Schmidt permet un calage des âges par construction d'une courbe de calibration en fonction du temps. Pour chaque méthode, les domaines d'application, les avantages et les limites sont présentés sur la base de cas d'étude dans la région du Mont Gelé (Alpes Valaisannes). L'objectif

principal de l'article est de présenter une méthodologie d'étude chronologique des formes périglaciaires alpines à l'aide de l'utilisation conjointe des deux méthodes.

2. Datation relative de formes périglaciaires alpines

2.1. La méthode paléogéographique

La méthode paléogéographique intègre la morpho-stratigraphie, qui permet de construire des chronologies relatives sur la base des relations géométriques (continuité, superposition, recoupement) entre formes géomorphologiques, et le calcul de paramètres paléoclimatiques, permettant la reconstitution de paléo-températures et de paléo-précipitations. Dans les régions de haute montagne, cette méthode est basée sur la morpho-stratigraphie des stades glaciaires et des glaciers rocheux. Cette approche permet de calculer la dépression de la ligne d'équilibre des glaciers (DLEG) et la dépression du pergélisol (DP). Ces deux variables sont très importantes dans l'étude chronologique de l'évolution climatique des régions de haute montagne (par ex. Haeberli, 1983; Kerschner, 1985; Schoeneich, 1998; Scapozza et Fontana, 2009), car elles varient en fonction des fluctuations des températures et des précipitations à la ligne d'équilibre des glaciers (pour la DLEG) et à la limite inférieure du pergélisol (LIP) (pour la DP).

Inspirée des travaux de Schoeneich (1998), la démarche adoptée pour étudier les modalités du retrait glaciaire de la région d'étude au Tardiglaciaire est basée sur quatre étapes principales (Fig. 1; pour plus de détails, voir Scapozza et Fontana, 2009) :

1. La cartographie géomorphologique de détail des formes d'origine glaciaire et périglaciaire (Fig. 1, lettre A).
2. La numérotation de l'amont vers l'aval de toutes les moraines permettant de reconstituer une position du front glaciaire (Fig. 1, lettre B). Les moraines sont ensuite combinées pour définir des positions de référence du paléoglacier.
3. La reconstitution de la position la mieux marquée et qui se prête à une reconstruction de la surface glaciaire la plus cohérente possible pour chaque groupe de positions reliées par des moraines latérales communes (Fig. 1, lettre C). Pour chaque position retenue, l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire théorique (LEG) a été calculée selon la méthode de partage des surfaces, avec un AAR (*Accumulation Area Ratio*) de 0.67 (cf. Gross et al., 1976; Schoeneich, 1998; Scapozza et Fontana, 2009).
4. L'établissement d'une séquence morpho-stratigraphique locale tenant compte de toutes les moraines et de tous les glaciers rocheux du même cirque glaciaire ou d'une même vallée (Fig. 1, lettre D). Les séquences locales ont été ensuite corrélées entre elles sur la base des valeurs de la DLEG et de la DP, de la morphologie des moraines, des glaciers rocheux et de la similitude d'évolution des glaciers, afin de définir une séquence composite régionale.

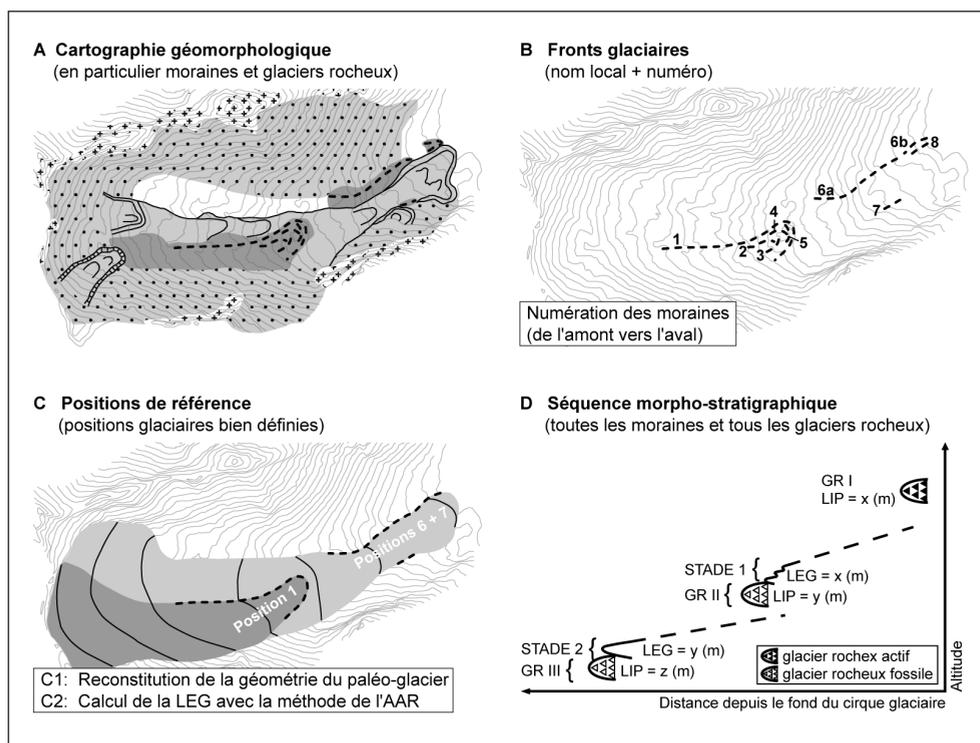


Fig. 1 : Méthodologie de nomenclature et de reconstitution des stades glaciaires adoptée dans cette étude (modifié d'après Scapozza et Fontana, 2009). Explications dans le texte. LEG : ligne d'équilibre glaciaire ; LIP : limite inférieure du pergélisol discontinu ; GR : génération de glaciers rocheux. La dépression de la ligne d'équilibre des glaciers (DLEG) se calcule en soustrayant la LEG calculée à la LEG de référence du stade 1850. La dépression du pergélisol (DP) se calcule en soustrayant l'altitude de la LIP passée à l'altitude de la LIP actuelle (déterminée sur la base des glaciers rocheux actuellement actifs/inactifs).

2.2. Le marteau de Schmidt

Le marteau de Schmidt (*Schmidt hammer*), appelé également scléromètre à béton, est un appareil mécanique portable développé à partir des années 1950, permettant le contrôle rapide et non destructif de la qualité d'un matériel sur la base de la mesure d'une valeur de rebondissement (Schmidt, 1950). La valeur de rebondissement (valeur-*R*) est proportionnelle à la résistance à la compression de la surface de la roche qui, pour une même pétrographie soumise à des conditions climatiques similaires, est proportionnelle au degré d'altération de la roche (McCarroll, 1989; Laustela et al., 2003). Tenant compte de l'histoire du transport de la roche, qui peut influencer la rugosité de surface de l'échantillon à mesurer, il est possible de faire des datations relatives de l'âge d'exposition de la roche aux agents atmosphériques sur la base des valeurs-*R* (Fig. 2). Des valeurs élevées indiquent des âges jeunes, et vice-versa. Le marteau de Schmidt a été passablement utilisé à partir des années 1980 dans les études d'environnements glaciaires et périglaciaires, en particulier pour la datation relative de la surface

de moraines (par ex. McCarroll, 1989; Shakesby et al., 2006) et de glaciers rocheux (par ex. Frauenfelder et al., 2005; Kellerer-Pirklbauer et al., 2008).

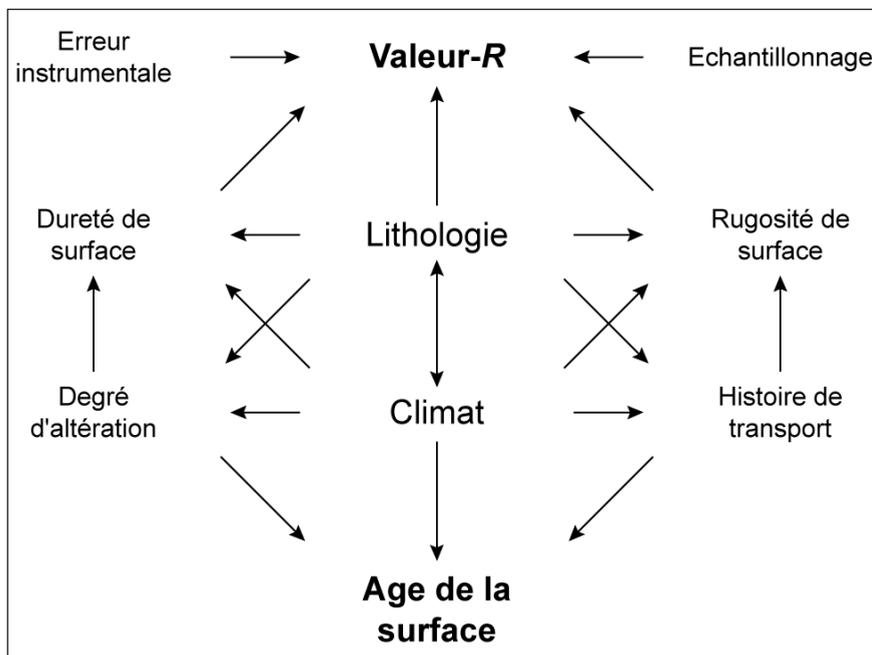


Fig. 2 : Facteurs qui peuvent influencer la valeur-R et donc l'âge de la surface d'un échantillon et leurs relations. Modifié d'après McCarroll (1989).

Les mesures ont été effectuées en choisissant la plus grande variété de stations de mesure par site. Le but n'étant pas la datation d'une seule forme géomorphologique, mais plutôt la compréhension des relations stratigraphiques et sédimentaires entre toutes les formes présentes sur le terrain d'étude, la stratégie de datation a dû tenir compte de la complexité des transferts sédimentaires actuels ou passés (Fig. 3, lettre A). Sur les éboulis et les glaciers rocheux, au moins trois stations de mesure par site, alignées au centre de la formation, ont été choisies. Pour chaque station de mesure, au moins 5 blocs ont été mesurés (Fig. 3, lettre B). Pour chaque bloc, la valeur-R a été mesurée au même emplacement quatre fois, ceci pour au moins 10 points de mesure (Fig. 3, lettre C). La première mesure n'a jamais été utilisée, car elle donnait systématiquement une valeur-R plus faible par rapport aux mesures 2 et 3 en raison de la poussière qui recouvrait la surface des blocs. La quatrième mesure, au contraire, a servi de valeur de contrôle, et présentait généralement la valeur-R la plus élevée à cause de l'aminçissement de la couche superficielle d'altération suite aux impacts 1 à 3. La moyenne arithmétique des 50 mesures (tenant compte seulement des deux valeurs médianes pour chaque groupe de quatre impacts) a enfin été calculée avec un intervalle de confiance de 95% (Kellerer-Pirklbauer, 2008). Il est important que la surface du bloc à dater soit relativement plane, peu rugueuse (pas de lichens, pas de gros minéraux), sèche, propre, sans fissures et de lithologie homogène (McCarroll, 1989; Shakesby et al., 2006). Une calibration des âges en fonction de la valeur-R sur la base de surfaces d'âge connu a enfin été essayée par régression linéaire (cf.

Kellerer-Pirklbauer, 2008; Matthews et Owen, 2010). Dans cette étude, un marteau de Schmidt digital (*Digi-Schmidt*), modèle LD de la firme suisse Proceq, a été utilisé.

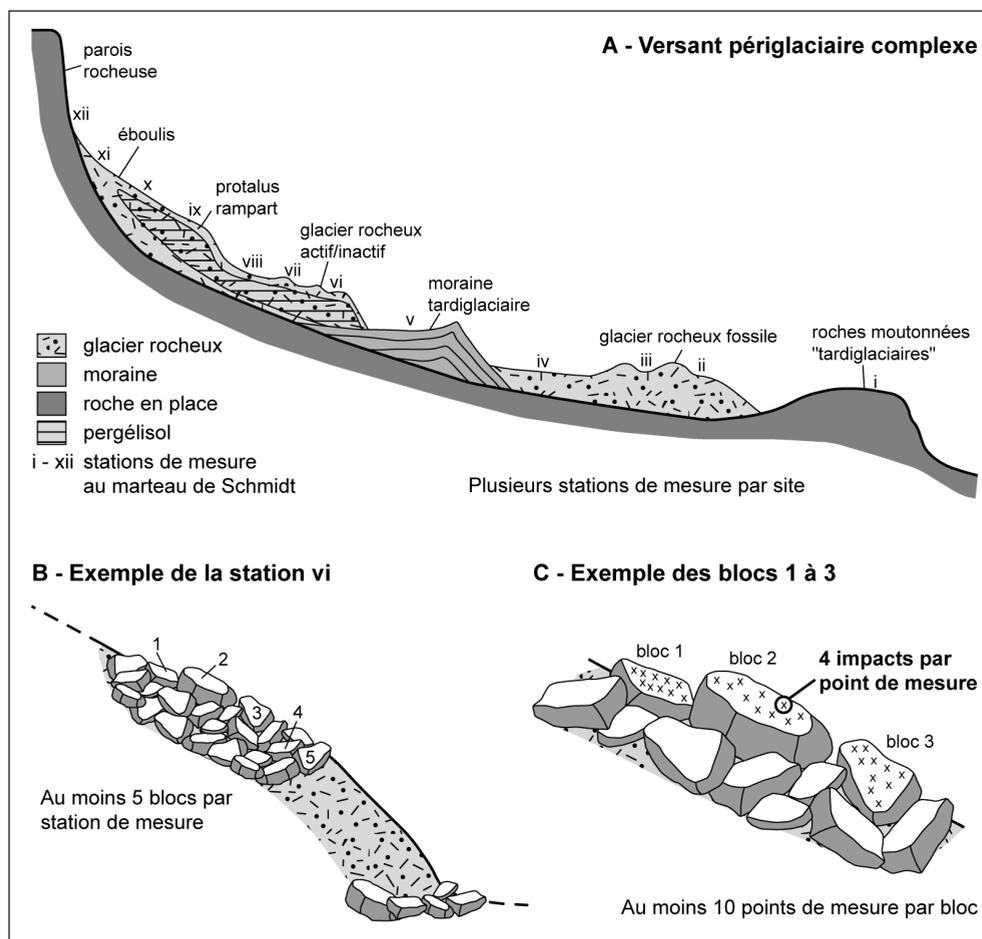


Fig. 3 : Stratégie de datation relative à l'aide du marteau de Schmidt de formes glaciaires et périglaciaires alpines.

3. Résultats et interprétation

3.1. Le retrait glaciaire dans la région du Mont Gelé

La région du Mont Gelé est particulièrement riche en formes d'origine glaciaire et périglaciaire (Lambiel et Reynard, 2003). Actuellement, nous y trouvons 3 glaciers et 38 glaciers rocheux (Fig. 4), parmi lesquels 22 sont actifs/inactifs et 16 fossiles. L'étude des formes d'accumulation d'origine glaciaire a permis de mettre en évidence, pour les 5 bassins glaciaires considérés, 16 positions de référence (stades locaux) qui ont été regroupées sur la base des valeurs de la dépression de la ligne d'équilibre (DLEG) et de la morphologie des moraines en 7 stades glaciaires régio-

naux (Tab. 1 et Fig. 5). Entre ces stades glaciaires, il a été possible d'insérer trois générations de glaciers rocheux (Fig. 5).

Stade local	Positions de référence	LEG (m)	DLEG (m/1850)	Stade régional	Corrélation avec « Alpes Orientales »
Glacier de Tortin					
PAG	TO-4/6/9 YC-1/3	2820	-	BN 0	PAG
Tortin	TO-12/16/18/21/23/25, YC-4 ?	2615	205	BN 1	Egesen III
Le Véla	TO-13/26/28, YC-4 ?	2580	240	BN 2	Egesen II
Crouye Sina	TO-14/17/19/29, LR-1/2	2500	320	BN 3	Egesen I
Déna Vio	Limites du paléo-glacier d'après Müller et al. (1980, 1983)	2460	360	BN 4	Daun
L'Antié		2390	430	BN 5	Clavadel/Senders
Gotetta		2210	610	BN 6	Gschnitz
Glacier des Lapires					
Les Lapires	LA-1	2490	330	BN 3	Egesen I
Plan des Ouchelets	LA-2/4/5/10/	2330	490	BN 4	Daun
Glacier de la Tsa					
Plan de la Tsa	LT-1	2450	450 ?	BN 4 ?	Daun ?
Glacier de La Chaux					
PAG	LC-8/9/12	2750	-	BN 0	PAG
Patiéfray	LC-13	2455	295	BN 3	Egesen I
Grenier de La Chaux	LC-21/23/25/26	2370	380	BN 4	Daun
Les Cléroudes	LC-20/22/25	2340	410	BN 5	Clavadel/Senders
Zone Verbier amont					
Mayentset	Limites du paléo-glacier d'après Burri (1974)	2235	755	BN 6	Gschnitz
Plan du Loup		2190	750	BN 6	Gschnitz

Tab. 1 : Définition des stades locaux sur la base des positions de référence (pour la numérotation des moraines, voir la fig. 4), calcul de la DLEG (pour la surface des paléo-glaciers, voir la fig. 6), définition des stades régionaux et essai de corrélation avec le modèle « Alpes Orientales » de Maisch (1981). La corrélation des stades est basée sur la séquence de référence régionale du Val de Nendaz (voir Müller *et al.*, 1980, 1983 ; Scapozza, données non publiées).

La séquence composite régionale obtenue a été corrélée avec le modèle « Alpes Orientales » de Maisch (1981) (Tab. 1) en utilisant comme référence régionale la séquence de retrait glaciaire établie dans le Val de Nendaz (partie nord-orientale du terrain d'étude, voir Fig. 4) par Müller *et al.* (1980, 1983). Il est donc possible d'avoir une image du retrait glaciaire dans la région depuis le Dryas ancien (Fig. 5 et 6), caractérisé par trois importants groupes de stades glaciaires (BN 6, BN 4-5 et BN 1-3) intercalés par des phases de retrait importantes.

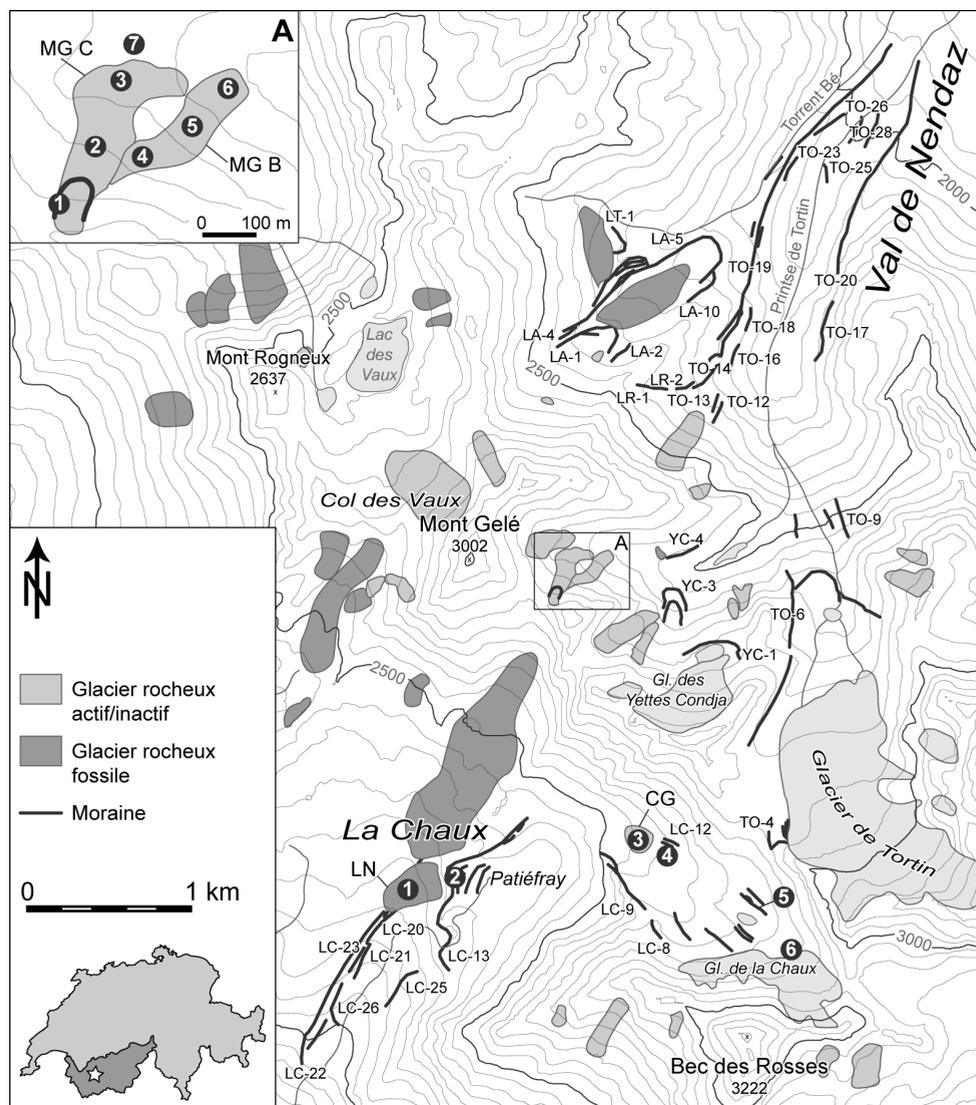


Fig. 4 : Formes glaciaires et périglaciaires dans la région du Mont Gelé. Compilation d'après Lambiel et Reynard (2003) et observations personnelles des auteurs. Les chiffres indiquent les stations de mesure au marteau de Schmidt de la fig. 7. Les codes suivi d'un numéro marquent les moraines qui ont été utilisées pour reconstruire les positions glaciaires de référence (voir aussi tableau 1 : TO = Tortin ; YC = Yettes Condja ; LR = Lués Rares ; LA = Lapieres ; LT = La Tsa ; LC = La Chaux). MG B et MG C : glaciers rocheux « Mont Gelé B et C » ; LN : glacier rocheux « Les Naires » ; CG : glacier rocheux du « Col des Gentianes ».

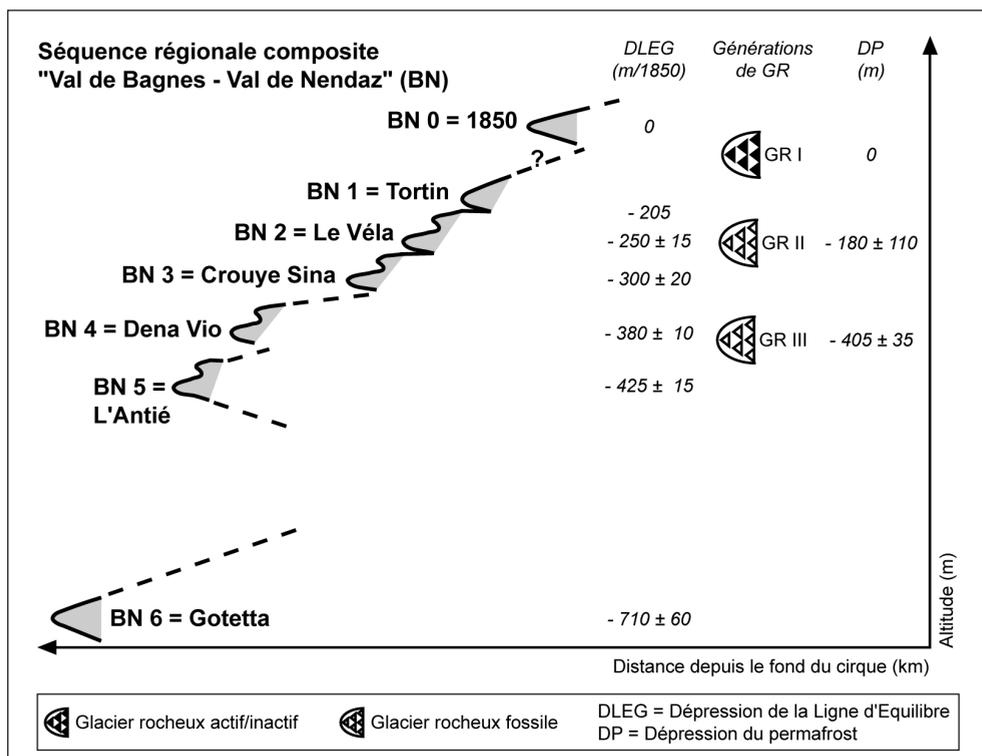


Fig. 5 : Séquence composite régionale de déglaciation de la région du Mont Gelé regroupant les positions glaciaires corrélables entre elles en stades (BN, notés en chiffres arabes) et les générations de glaciers rocheux (GR, notées en chiffres romains). La corrélation des stades est basée sur la séquence de référence régionale du Val de Nendaz (voir Müller et al., 1980, 1983 ; Scapozza, données non publiées).

La séquence composite régionale de retrait glaciaire a également permis de caler chronologiquement les phases de développement des glaciers rocheux de la région (Fig. 5). Les glaciers rocheux de la génération GR II, qui se situent en moyenne environ 180 m plus bas que les glaciers rocheux actuellement actifs/inactifs (GR I), se seraient développés après le stade glaciaire BN 3, qui a été corrélé avec l'avancée maximale du stade de l'Egesen, et seraient contemporains des stades BN 2 et BN 1. Le début de la formation de ces glaciers rocheux correspondrait donc à la deuxième partie du Dryas récent, après le stade maximal de cette période froide. Leur développement pourrait s'être poursuivi jusqu'au Boréal, et leur inactivation pourrait s'être produite au début de l'Atlantique. Les glaciers rocheux de la génération GR III, avec une dépression du pergélisol (DP) moyenne d'environ 400 m, seraient contemporains du stade glaciaire BN 4 (fin du Dryas ancien). Leur inactivation/fossilisation pourrait s'être produite pendant l'interstade tardiglaciaire du Bølling-Allerød, avec une réactivation possible des formations situées à plus haute altitude au Dryas récent. Ces résultats concordent avec une autre étude menée dans la région du Mont Gelé (Lambiel et Reynard, 2003) et avec des études similaires menées dans d'autres régions des Alpes, en particulier dans le Tyrol autrichien

(Kerschner, 1985; Sailer et Kerschner, 1999) et dans les Alpes Tessinoises orientales (Scapoza et al., 2008; Scapoza et Fontana, 2009).

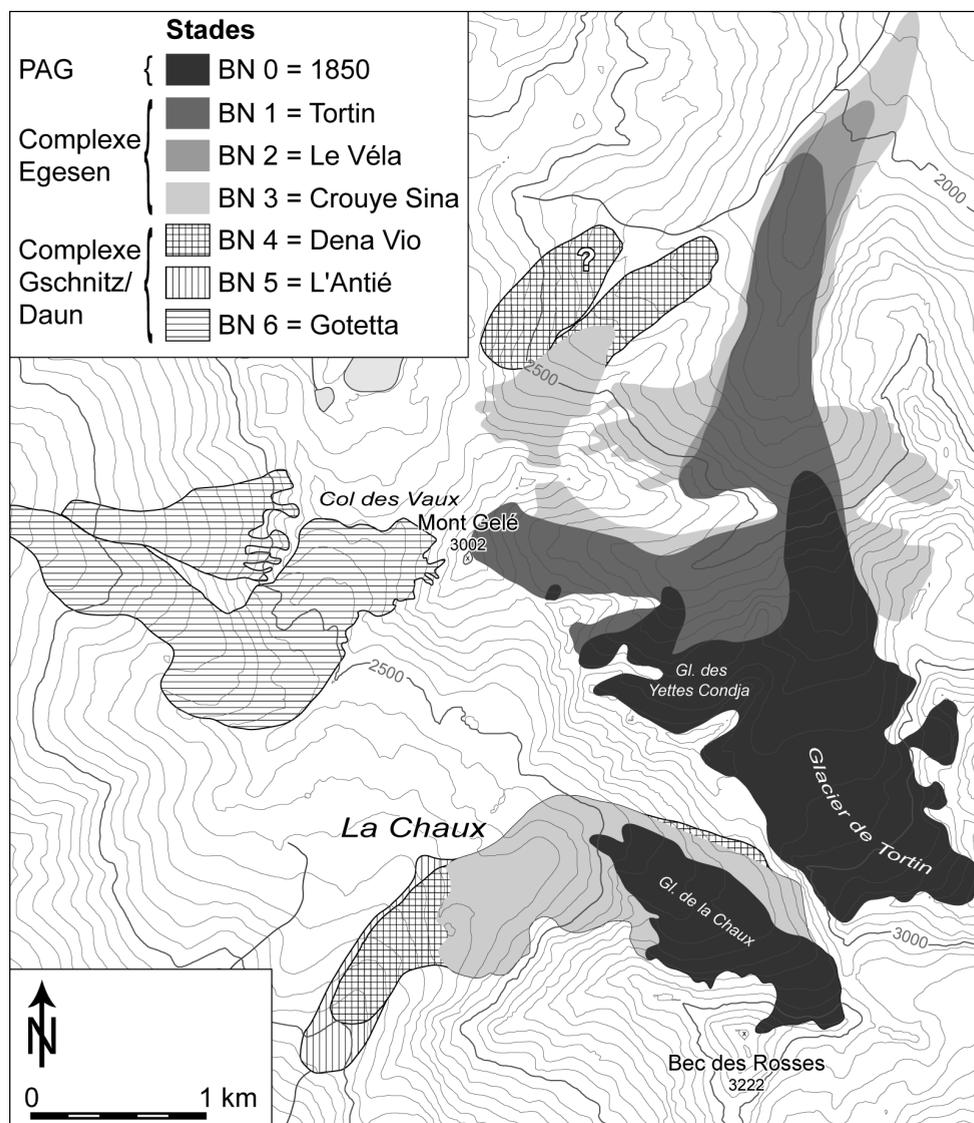


Fig. 6. Les paléo-glaciers de la région du Mont Gelé depuis le milieu du Tardiglaciaire. Les valeurs de dépression de la LEG pour chaque stade sont présentées dans le tableau 1. La corrélation avec le modèle « Alpes Orientales » de Maisch (1981) est basée sur la séquence de référence régionale du Val de Nendaz (voir Müller et al., 1980, 1983).

3.2. Ages d'exposition déterminés à l'aide du marteau de Schmidt

Cas d'étude 1 : région de La Chaux

La marge proglaciaire historique du glacier de La Chaux présente des formes assez complexes, dues à la récurrence glaciaire du Petit Age Glaciaire (PAG) qui a partiellement remanié une partie du glacier rocheux du Col des Gentiannes, dont seule la partie frontale est visible aujourd'hui (Reynard et al., 2003). Afin de connaître la chronologie de l'évolution de la région de La Chaux depuis la fin du Tardiglaciaire, six stations de mesure entre la région de Patiéfray et le glacier de La Chaux ont été choisies (Fig. 4). La calibration des âges en fonction de la valeur- R a été établie sur la base des valeurs de rebondissement obtenues sur les moraines de Patiéfray ($R = 46$), corrélées avec le stade BN 3 (Fig. 6) et donc attribuées au Dryas récent, et sur les roches moutonnées mises à jour ces dernières années à l'aval du front du glacier de La Chaux ($R = 57$). Globalement, la marge d'erreur augmente avec l'âge (Fig. 7, lettre A).

L'âge calculé du glacier rocheux fossile des Naires, qui a été alimenté par les dépôts morainiques de Patiéfray, est de 8.4 ± 1.5 cal ka BP, indiquant qu'il se serait développé dès le Dryas récent, et qu'il serait vraisemblablement devenu fossile au début de l'Atlantique. Le glacier rocheux du Col des Gentiannes présente un âge calculé de 6.3 ± 0.9 cal ka BP, montrant qu'il a commencé à évoluer vers la fin de l'optimum climatique de l'Atlantique. Plus difficile à interpréter est l'âge calculé de 5.2 ± 0.9 cal ka BP déterminé sur la partie droite de la marge proglaciaire, indiquant une pré-exposition des dépôts rocheux antérieure au PAG. Cette partie pourrait correspondre à une zone où le glacier rocheux du Col des Gentiannes a été remanié par le glacier de La Chaux au PAG : cette explication reste une hypothèse, car aucun élément morphologique témoignant du remaniement du glacier rocheux (moraine de poussée) n'est visible à cet endroit. L'âge calculé de la moraine historique, enfin, confirme que celle-ci est relativement récente (1.0 ± 0.8 cal ka BP). Il est toutefois difficile d'attribuer les blocs mesurés à l'une ou l'autre des récurrences glaciaires de la deuxième partie de l'Holocène. Les mesures ont été effectuées sur de très gros blocs, qui pourraient dater d'une récurrence glaciaire antérieure au PAG et ne pas avoir été recouverts par les dépôts les plus récents.

Cas d'étude 2 : glaciers rocheux du Mont Gelé B et C

Les glaciers rocheux actifs du Mont Gelé B et C se situent dans le vallon des Yettes Conджа, à l'est du Mont Gelé (Fig. 4). Des études sur la structure interne et la dynamique de ces glaciers rocheux y sont menées depuis 1998 (voir Lambiel, 2006). Sept stations de mesure, (trois sur chaque glacier rocheux et une sur les roches moutonnées situées à l'aval du front du glacier rocheux C) ont été choisies (Fig. 4, lettre A). Les valeurs de rebondissement de référence permettant de calibrer les âges ont été mesurées sur les roches moutonnées du stade BN 1 (Dryas récent; $R = 44$) et sur la partie interne de la moraine du PAG située aux racines du glacier rocheux C ($R = 53$) (Fig. 6).

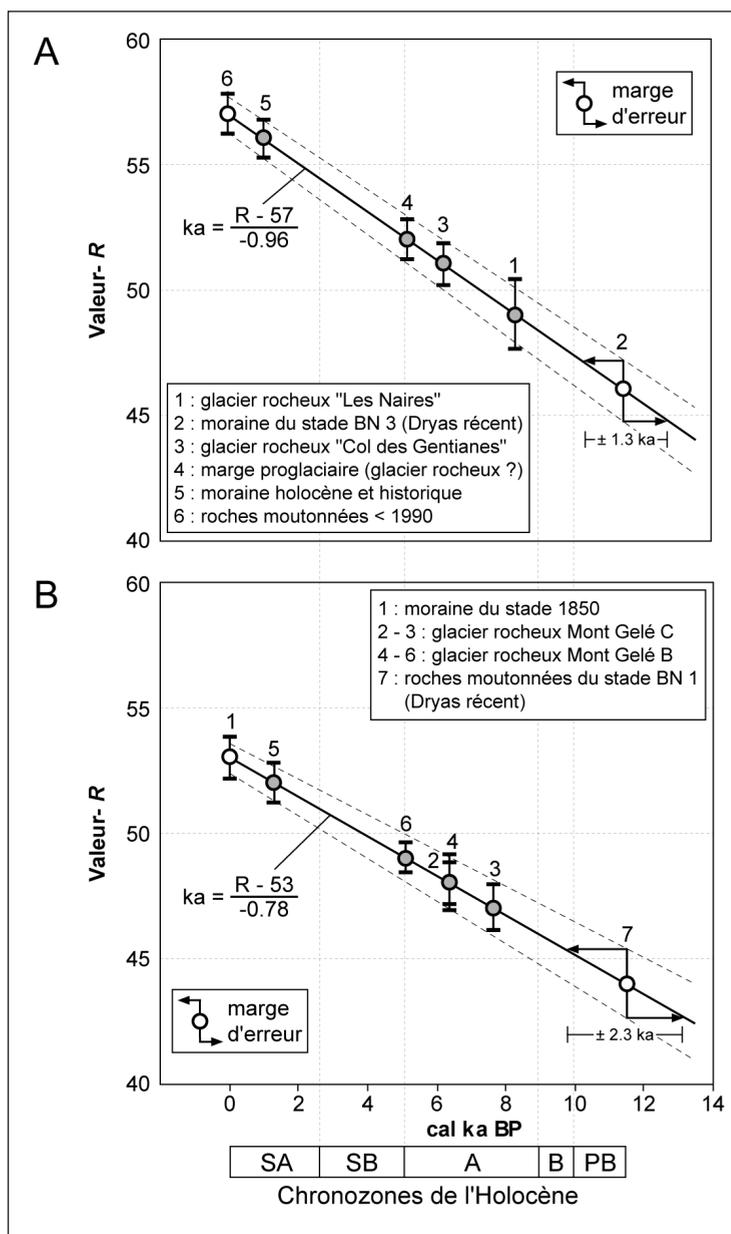


Fig. 7 : Essai de calibration de l'âge en fonction de la valeur-R sur la base de surfaces d'âge connu (cercles blancs) pour la zone de La Chaux (A) et les glaciers rocheux du Mont Gelé B et C (B). Dans les deux cas, le calcul de la marge d'erreur est présenté pour les deux sites du Dryas récent. Les cercles gris indiquent les âges calculés. Pour la position des stations de mesure, voir la fig. 4. Chronozones de l'Holocène : SA = Subatlantique ; SB = Subboréal ; A = Atlantique ; B = Boréal ; PB = Préboréal.

L'âge calculé de la surface des deux glaciers rocheux est comprise entre 7.7 ± 1.1 cal ka BP et 5.1 ± 0.7 cal ka BP (Fig. 7, lettre B). Les deux glaciers rocheux auraient donc commencé à évoluer à partir de la période Atlantique et ils se seraient vraisemblablement développés tout au long de la deuxième partie de l'Holocène. A la station 5, située sur la partie centrale du glacier rocheux B, l'âge calculé est de 1.3 ± 1.0 cal ka BP, ce qui est beaucoup plus jeune que les autres âges mesurés. Les mesures ont été effectuées sur un replat situé au centre du glacier rocheux. D'une part, cet endroit est favorable à la persistance de la neige, ce qui pourrait « rajeunir » les valeurs de rebondissement des blocs par réduction de l'exposition aux agents atmosphériques. D'autre part, ce replat se situe juste à l'aval d'une zone très instable (cf. Lambiel, 2006), qui pourrait fournir par gravité des blocs provenant de l'intérieur du glacier rocheux (donc avec des âges d'exposition plus jeunes).

4. Discussion et conclusion

L'utilisation conjointe des deux méthodes utilisées a permis de préciser la chronologie de l'évolution du relief à partir du dernier maximum glaciaire, sans devoir se limiter au Tardiglaciaire ou à l'Holocène. Concernant l'évolution des glaciers et des glaciers rocheux de la région depuis 15'000 BP, il a été possible de mettre en évidence 6 stades glaciaires régionaux tardiglaciaires, qui ont été regroupés en deux complexes de stades. Les trois stades plus anciens ont été regroupés dans le complexe Gschnitz/Daun, tandis que les trois autres stades ont été regroupés dans le complexe Egesen. Pour les glaciers rocheux, trois générations de ces formes ont été identifiées. La génération la plus ancienne (GR III) se serait développée à partir de la fin du complexe Gschnitz/Daun. La génération GR II se serait développée à partir de la deuxième moitié du Dryas récent, et se serait fossilisée au début de l'Atlantique, comme l'indiquerait l'âge minimal du glacier rocheux des Naires. Les glaciers rocheux actuellement actifs/inactifs (génération GR I), enfin, se seraient développés à partir de la période Atlantique, comme l'indiquerait l'âge calculé de la surface des glaciers rocheux du Col des Gentianes et du Mont Gelé B et C.

Dans ce contexte, la méthode paléogéographique a permis d'identifier les stades tardiglaciaires de la région et de donner le point d'accrochage chronologique maximal aux calibrations des âges en fonction des valeurs-*R* mesurées. Le marteau de Schmidt, par la suite, a permis d'affiner la chronologie Holocène des événements. Ceci a été testé dans les études de cas présentées dans cet article. Dans les détails, la méthode paléogéographique a permis de proposer une attribution chronologique aux moraines de Patiéfray (Fig. 6 et 7A) et aux roches moutonnées à l'aval du glacier rocheux du Mont Gelé C (Fig. 7B), ce qui a constitué le point d'accrochage maximal pour calibrer les âges en fonction des valeurs de rebondissement. Le marteau de Schmidt a permis de mieux différencier la chronologie de développement des glaciers rocheux étudiés. Avec la seule méthode paléogéographique, en effet, ceux-ci auraient été considérés simplement comme datant du Dryas récent (pour le glacier rocheux fossile des Naires), ou de l'Holocène (pour les glaciers rocheux du Col des Gentianes et du Mont Gelé B et C).

Malgré la bonne complémentarité des deux méthodes présentées, la validité de chacune d'entre elles semble être limitée à un contexte chronologique particulier. La

méthode paléogéographique est basée sur l'étude de l'étagement altitudinal dégressif des systèmes morphogénétiques glaciaire et périglaciaire, dicté par des changements climatiques importants. Les variations climatiques qui permettent de produire des formes à des altitudes différentes selon l'alternance entre les périodes glaciaires (stades glaciaires) et les périodes « périglaciaires » (périodes post-stadiales et interstadiales) sont typiques du Tardiglaciaire alpin. La méthode paléogéographique est donc intéressante pour l'étude de cette période. A l'échelle de l'Holocène, au contraire, il est souvent très difficile de pouvoir différencier des récurrences glaciaires ou des générations de glaciers rocheux sans recourir à des datations absolues (radio-carbone, isotopes cosmogéniques, luminescence). Il en résulte que, le plus souvent, cette période, bien que plus longue que l'ensemble du Tardiglaciaire, est seulement caractérisée dans les séquences morpho-stratigraphiques par la récurrence glaciaire du PAG et par la génération de glaciers rocheux actuellement actifs/inactifs (Fig. 5).

Durant l'Holocène, en effet, l'ampleur des variations climatiques n'a pas été assez importante pour marquer une évolution altitudinale des systèmes morphogénétiques. Il en résulte que l'enregistrement sédimentaire des changements climatiques s'est fait le plus souvent à l'intérieur d'une seule forme, par exemple par superposition de dépôts morainiques ou de lobes de glaciers rocheux ou par stratification des éboulis. Le marteau de Schmidt est une méthode intéressante pour étudier les formes holocènes, car il permet de différencier les âges de surface d'une même forme (par exemple un glacier rocheux), selon l'endroit où est effectuée la mesure. Par contre, le marteau de Schmidt semble être moins adapté pour différencier chronologiquement les formes tardiglaciaires, car la marge d'erreur des âges calculés au-delà de 10'000 BP est souvent supérieure à la périodicité des fluctuations climatiques que l'on veut étudier (Fig. 7).

Remerciements

Nous remercions Regula Frauenfelder pour ses nombreux conseils et suggestions lors de la relecture du manuscrit.

Bibliographie

- Burri, M. (1974). Histoire et préhistoire glaciaires des vallées des Drances (Valais). *Eclogae geologicae Helveticae*, 67 : 135-154.
- Frauenfelder, R., Laustela, M. et Kääb, A. (2005). Relative age dating of Alpine rockglacier surface. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 49 : 145-166.
- Gross, G., Kerschner, H. et Patzelt, G. (1976). Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 12 : 223-251.
- Haeblerli, W. (1983). Permafrost-glacier relationships in the Swiss Alps – today and in the past. *Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, July 1983* : 415-420.

- Haeberli, W., Brandova, D., Burga, C., Egli, M., Frauenfelder, R., Kääh, A., Maisch, M., Mauz, B. et Dikau, R. (2003). Methods for absolute and relative age dating of rock-glaciers surfaces in alpine permafrost. *Proceeding of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, July 2003* : 343-348.
- Ivy-Ochs, S. et Kober, F. (2008). Surface exposure dating with cosmogenic nuclides. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 57 : 179-209.
- Kellerer-Pirklbauer, A. (2008). The Schmidt-Hammer as a relative age dating tool for rock glacier surfaces: examples from Northern and Central Alps. *Proceeding of the 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, June 2008* : 913-918.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Wangenstein, B., Farbrot, H. et Etzelmüller B. (2008). Relative surface age-dating of rock glacier systems near Hólar in Hjaltdalur, northern Iceland. *Journal of Quaternary Science*, 23 : 137-151.
- Kerschner, H. (1985). Quantitative paleoclimatic inferences from lateglacial snow-line, timberline and rock glacier data, Tyrolean Alps, Austria. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 21 : 363-369.
- Lambiel, C. (2006). *Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : distribution, régime thermique et instabilités*. Thèse de Doctorat, Institut de Géographie de l'Université de Lausanne, Travaux et recherches, 33, 260 pp.
- Lambiel, C. et Reynard, E. (2003). Cartographie de la distribution du pergélisol et datation des glaciers rocheux dans la région du Mont Gelé (Valais). *Physische Geographie*, 41 : 91-103.
- Laustela, M., Egli, M., Frauenfelder, R., Kääh, A., Maisch, M. et Haeberli, W. (2003). Weathering rind measurements and relative age dating of rockglacier surfaces in crystalline regions of the Eastern Swiss Alps. *Proceeding of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, July 2003* : 627-632.
- Maisch, M. (1981). Glazialmorphologische und Gletschergeschichtliche Untersuchungen im gebiet zwischen Landwasser- und Albulatal (Kt. Graubünden, Schweiz). PhD Thesis, Geographisches Institut der Universität Zürich. *Physische Geographie*, 3 : 1-215.
- Matthews, J.A. et Owen, G. (2010). Schmidt hammer exposure-age dating: developing linear age-calibration curves using Holocene bedrock surfaces from the Jotunheimen–Jostedalbreen regions of southern Norway. *Boreas*, 39 : 105-115.
- McCarrol, D. (1989). Potential and limitations of the Schmidt Hammer for relative-age dating: field tests on Neoglacial moraines, Jutunheimen, Southern Norway. *Arctic and Alpine Research*, 21 : 268-275.
- Müller, H.-N, Kerschner, H. et Küttel, M. (1980). Gletscher- und Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen im Val de Nendaz (Wallis) – Ein Beitrag zur Alpenen Spätglazialchronologie. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 16 : 61-84.
- Müller, H.-N, Kerschner, H. et Küttel, M. (1983). The Val de Nendaz (Valais, Switzerland). A type locality for the Egesen advance and the Daun advance in the Western Alps. In H. Schröder-Lanz (ed.), *Late- and postglacial oscillations of glaciers: glacial and periglacial forms* (pp. 73-82). Rotterdam: Balkema.
- Reynard, E., Lambiel, C., Delaloye, R., Devaud, G., Baron, L., Chapellier, D., Marescot, L. et Monnet, R. (2003). Glacier/permafrost relationship in forefields of small glaciers (Swiss Alps). *Proceeding of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, July 2003* : 947-952.
- Sailer, R. et Kerschner, H. (1999). Equilibrium-line altitudes and rock glaciers during the Younger Dryas cooling event, Ferwall group, western Tyrol, Austria. *Annals of glaciology*, 28 : 141-145.
- Scapozza, C. et Fontana, G. (Eds) (2009). Le Alpi Bleniesi. Storia glaciale e periglaciale e patrimonio geomorfologico. *Memorie della Società ticinese di Scienze naturali e del Museo cantonale di storia naturale, Lugano*, 10 : 1-111.
- Scapozza, C., Lambiel, C. et Reynard, E. (2008). Glaciers rocheux et distribution régionale du pergélisol discontinu dans les Alpes Tessinoises orientales (Suisse). In C. Rothenbühler (ed.), *Klimaveränderungen auf der Spur* (pp. 79-92). Samedan: Studien des Europäischen Tourismus Instituts an der Academia Engiadina, Vol. 5.

- Scapozza, C., Lambiel, C., Reynard, E., Fallot, J.-M., Antognini, M. et Schoeneich, P. (2010). Radiocarbon dating of fossil wood remains buried by the Piancabella rock glacier, Blenio Valley (Ticino, Southern Swiss Alps): implications for rock glacier, treeline and climate history. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21 : 90-96.
- Schmidt, E. (1950). Der Beton-Prüfhammer – Ein Gerät zur Bestimmung der Qualität des Betons im Bauwerk. *Schweizerische Bauzeitung*, 68 : 378-379.
- Schoeneich, P. (1998). *Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Étivaz (Préalpes vaudoises)*. Thèse de Doctorat, Institut de Géographie de l'Université de Lausanne, Travaux et recherches, 14, 483 pp.
- Shakesby, R.A., Matthews, J.A. et Owen, G. (2006). The Schmidt hammer as a relative-age dating tool and its potential for calibrated-age dating in Holocene glaciated environments. *Quaternary Science Reviews*, 25 : 2846-2867.