CARTOGRAPHIER LES CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MONTAGNE

Suivi diachronique de l'englacement

par Étienne Cossart

UMR Prodig 8586 – CNRS Université Paris 1 – Panthéon Sorbonne
2 rue Valette 75005 Paris
Courriel : etienne.cossart@univ-paris1.fr
Téléphone : 01 44 07 75 76

Cartographier le changement, c'est, par exemple – pour les géographes physiciens –, cartographier le changement climatique et ses conséquences. En effet, aux côtés des spécialistes des sciences de la Terre et de l'atmosphère, les géographes ont une place particulière, qui peut se définir autour de la cartographie à différentes échelles des phénomènes mesurés et observés. Nous illustrons cette place spécifique à travers le cas des variations glaciaires affectant les zones de montagne : aux mesures stationnelles directes, effectuées sur quelques glaciers par les glaciologues, le géographe ajoute d'autres points de vue, visant notamment à élargir les bases de données. Cet élargissement est à la fois spatial, par l'acquisition des données sur un plus grand nombre de glaciers, et temporel, si l'on remontet le temps à des dates antérieures aux séries de mesures directes. Ces bases de données spatio-temporelles peuvent ensuite donner lieu à des représentations cartographiques à des échelles fines, où l'accent est mis sur des quantifications de la variation de superficie ou d'épaisseur, ainsi qu'à des échelles régionales, où l'accent est mis sur les variations de l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire. Les cartes diachroniques régionales, produites par des méthodes d'analyse spatiale qui s'affinent progressivement, offrent au final des documents essentiels pour l'ensemble de la communauté scientifique.

1 Introduction

Parmi les changements observés, suivis et cartographiés par les géographes, ceux liés au réchauffement climatique contemporain constituent un champ de recherches fécond. En effet, les éléments constitutifs du milieu physique (espèces végétales, lacs, cours d'eau, glaciers…) sont autant d'objets dont l'évolution récente permet de mesurer les empreintes des changements globaux. Cette évolution permet, par ailleurs, de comprendre quelles peuvent être les contraintes imposées, en retour, aux sociétés : de l'évolution du milieu physique dépend la disponibilité de multiples ressources naturelles, telles que l'eau, les sols, ou encore la biodiversité.

Or le suivi de différents éléments du milieu physique nécessite un véritable travail de spatialisation, qui rend l'approche géographique indispensable dans le concert des recherches portant sur les changements globaux. Ce travail de spatialisation revêt un double enjeu scientifique. Il s'agit tout d'abord de cartographier les effets des changements climatiques à des échelles locales, fines. À ce niveau d'analyse, les conséquences des changements climatiques peuvent être étonnamment variables du fait des contextes locaux (topographie, exposition, etc.). Or de multiples chercheurs de disciplines connexes (sciences de la Terre notamment) n'abordent les changements qu'à travers des mesures stationnelles, des observations ponctuelles occultant, en grande partie, les effets des contextes locaux. Dès lors, ces mesures sont-elles significatives ? Comment interpoler dans l'espace ces observations ponctuelles ? Comment en effectuer une traduction cartographique ? En outre, les conséquences des changements climatiques doivent être généralisées et cartographiées à des échelles régionales : c'est à ces niveaux d'analyse que l'on peut offrir des éléments d'aide à la décision aux gestionnaires et praticiens de l'environnement. Bien sûr, passer de l'échelle fine à l'échelle régionale nécessite un travail d'analyse spatiale, pour lequel il faut trouver un juste équilibre entre le respect de la variabilité spa-

tiale des phénomènes observés et le nécessaire travail de généralisation.

Ce double enjeu, à deux échelles d'analyse complémentaires, montre tout l'intérêt d'une approche géographique et cartographique dans l'étude du changement climatique. Ainsi illustrons-nous, à travers le cas des conséquences du réchauffement dans les zones de montagne, le rôle que peuvent jouer les géographes physiciens aux côtés des spécialistes des sciences de la Terre. Nous porterons plus particulièrement notre attention sur la cryosphère de haute altitude, « sphère gelée » qui constitue un enjeu majeur dans la mesure où elle recèle des stocks d'eau « solide » considérables par leur volume. Or ces stocks sont progressivement dilapidés par fusion et modifient les cycles de l'eau locaux (Cossart 2006 ; Cossart et Le Gall 2008). Ils correspondent à la fois à la glace stockée en surface sous forme de glaciers, et à la glace enfouie, stockée dans le sol même sous forme de pergélisol. Les recherches concernant le suivi et la cartographie du pergélisol étant toujours en cours (Bodin, 2007), nous nous focaliserons ici sur l'englacement. Après avoir rappelé les spécificités du suivi de l'englacement, nous montrerons quelles sont les modalités pour cartographier son évolution à une échelle spatiale fine, puis à une échelle spatiale régionale.

2 Un bref historique des travaux menés sur les glaciers

Une rapide mise au point bibliographique permet de montrer le rôle des géographes dans la représentation des changements glaciaires.

2.1 Les pionniers des XVIIIe et XIXe siècles

Quelques pionniers ont, dès la fin du XVIIIe siècle, mené des investigations sur les « horribles glacières ». Parmi eux, Saussure (1803) montre que « ces masses glacées (…) doivent peu à peu glisser et descendre en suivant la pente des vallées et des pentes qu'elles couvrent » ; il effectue une première description des moraines et des roches-moutonnées. Scheuchzer avait commencé à décrire le glacier comme agent de transport, émettant l'hypothèse que « les glaciers rejettent (NDLR en aval) les corps étrangers tombés dans leurs crevasses » (dans Agassiz 1840). Jean de Charpentier avait ensuite prolongé ce raisonnement, arrivant à la conclusion que les blocs de granit disséminés dans les montagnes du Jura avaient été transportés depuis le massif alpin par des glaciers. Louis Agassiz, s'inspirant de ces travaux et se nourrissant des nombreuses observations effectuées sur le glacier de l'Aar (vallée de Zermatt, Suisse), formalise ses *Études sur les glaciers* (1840). Dans cet ouvrage, il décrit les mouvements des glaciers, mais son apport essentiel est la conception des glaciers comme des agents morphogènes laissant des traces bien visibles dans les paysages (blocs erratiques, moraines, etc.). Ces héritages géomorphologiques apparaissent comme des témoins de « l'extension variée des glaciers » et permettent – on le verra – de reconstituer leur géométrie passée.

2.2 Une systématisation des observations à la charnière des XIXe – XXe siècles

Le rayonnement des grands naturalistes du XIXe siècle, conjointement avec l'avènement de l'alpinisme, suscite un nouvel intérêt pour les milieux de montagne en général et pour les glaciers en particulier. La période foisonne de descriptions littérales ou de documents iconographiques réalisés par des « explorateurs » qui sillonnent les massifs montagneux. Dans les Alpes, les représentations du glacier du Giétro (par Hans Conrad Escher von der Linth) ou des « glaciers de Chamonix » (par R. Dikenman, J.-D. Hubert) sont particulièrement connues. Bien que moins célèbres, de tels documents existent dans les Pyrénées (par G. Doré, N. Diaz de la Peña, Eugène Viollet-le-Duc…) ou même dans les Andes (aquarelles du Chimborazo par Rudolf Reischreiter). Cette riche documentation constitue une base de données considérable pour mesurer le retrait glaciaire intervenu depuis.

2.3 Les séries de mesures élaborées par les glaciologues

Au début du XXe siècle s'amorcent des suivis quantifiés et systématisés de certains glaciers, sous l'impulsion, par exemple, de A. Allix (1924) et P. Mougin (1926) dans les Alpes françaises. Réalisées sous l'égide des services des eaux et forêts, ces séries de mesures ont été poursuivies par différents organismes de recherche (CEMAGREF et Labo-ratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement du CNRS). Des suivis topographiques (position des fronts glaciaires, altitude atteinte par les langues de glace, etc.) sont ainsi disponibles sur quelques glaciers emblématiques tels que le glacier d'Argentière (depuis 1904) ou le glacier de Gébroulaz (depuis 1907) dans le massif du Mont-Blanc, ou le glacier de Sarennes (depuis 1906) dans les Alpes dauphinoises. Dans les autres massifs montagneux du globe, des données ont commencé à être acquises au milieu du XXe siècle ; une synthèse des données glaciologiques, effectuée à l'échelle globale, est ainsi disponible (Francou et Vincent 2008).

2.4 Les apports des géographes

Ce rapide aperçu historique des investigations menées sur les glaciers montre qu'une large place peut-être faite, aux côtés des glaciologues, pour des approches géomorphologiques et géographiques. Si certains glaciers ont été observés et suivis depuis le XVIIIe siècle, leur suivi et leur cartographie ne se sont développés que très récemment, il y a un siècle environ dans les Alpes ou certains secteurs andins. La conséquence directe est que peu de glaciers ont fait l'objet de séries de mesures directes suffisamment longues pour documenter les changements climatiques à un pas de temps historique. Les géographes doivent donc reconstituer indirectement la géométrie de glaciers non étudiés auparavant pour (i) remonter dans le temps, au-delà des périodes pour lesquelles des suivis ont été effectués, et (ii) élargir les zones investiguées en augmentant le nombre de glaciers étudiés.

3 La cartographie à échelle fine des variations glaciaires

Aux échelles fines, le travail liminaire est le plus souvent un travail de cartographie géomorphologique qui permet ensuite de représenter les variations des superficies englacées, voire d'aboutir à des cartographies intégrant la dimension verticale, la variation d'épaisseur des glaciers.

3.1 La cartographie géomorphologique comme fondement

La cartographie géomorphologique suppose un travail de terrain, visant à recenser des héritages glaciaires. Elle permet la reconstruction de la géométrie passée de glaciers, éventuellement disparus. En effet, les marques d'abrasion, les accumulations sédimentaires typiques du fonctionnement glaciaire (moraines, blocs erratiques), peuvent donner des indications sur les secteurs qui ont été recouverts par les glaces (Rabatel *et al.* 2008 ; Cossart 2008). Il s'agit ensuite d'intégrer ces héritages glaciaires dans un cadre chronologique pour associer une phase d'englacement datée à chaque génération d'héritage glaciaire. L'objet n'est pas ici de documenter ces méthodes de datation (il est possible de se référer à Cossart *et al.* 2006 ; à Rabatel *et al.* 2008), mais plutôt de montrer comment les observations de terrain, cartographiées et géo-réferencées, constituent une base de données pouvant être intégrée dans un SIG et ouvrant deux perspectives en termes de cartographie des changements affectant un glacier.

3.2 Cartographie 2D des changements affectant un glacier

Il est tout d'abord possible de reconstituer les anciens contours glaciaires afin d'offrir une vision diachronique de l'extension du glacier en permettant, éventuellement, une quantification des variations de la superficie du glacier. Et les descriptions historiques peuvent compléter les informations que recèlent les héritages géomorphologiques. Dans le cas de la retombée orientale du massif des Écrins, un inventaire aussi exhaustif que possible de gravures et croquis a, par exemple, été effectué (Cossart *et al.* 2006). Le fonds du Club alpin français, le fonds « dauphinois » de la Bibliothèque de Grenoble et les Archives départementales des Hautes-Alpes conservent les principales sources de données. Dans certains cas, les gravures et autres documents iconographiques sont accompagnés de quelques mesures précises concernant la longueur des glaciers (Bonaparte 1890 & 1891 ; Kilian 1901 ; Rabot 1902 ; Allix 1924) et permettant de positionner le front glaciaire sur une carte. À partir de croquis, de cartes postales ou, plus généralement, de descriptions qualitatives de l'état du glacier, une extension relative des glaciers (en comparaison avec divers éléments du relief) peut être déterminée (Guillemin 1877 ; Godefroy 1909 ; Touchon 1910 ; Blanchard 1925 & 1926 ; Deplasse 1927 ; Mathieu & Blanchard 1928).

3.3 Cartographie 3D des changements affectant un glacier

Lorsque l'altitude des différents héritages glaciaires est connue (mesures GPS, triangulation…), il est également possible de déterminer l'altitude atteinte par les glaces et de matérialiser cette altitude par des isoglacio-hypses dans une nouvelle couche d'information du SIG. À partir de ces courbes de niveau, la topographie passée du glacier peut être simulée en utilisant des méthodes d'interpolation classiques dans l'élaboration de modèles numériques de terrain (MNT). Une interpolation par application d'un modèle TIN (critère de Delaunay) peut être utilisée à partir de points cotés issus des courbes de niveau. Cette méthode permet généralement de reconstituer fidèlement une surface potentiellement accidentée (Bonin et Rousseaux 2005) comme celle d'un glacier (Cossart, 2008).

La topographie passée du glacier, simulée sous forme d'un MNT, peut alors être comparée avec d'autres surfaces topographiques. Si le glacier a totalement disparu, alors la topographie du fond de vallée peut servir de repère pour estimer l'épaisseur de l'ancienne langue de glace. Si un glacier aminci demeure, alors sa surface constitue un élément de

comparaison pour obtenir une carte de la variation d'épaisseur. Dans le cas du glacier de l'Annapurna (Népal), il a, par exemple, été possible de mesurer l'amincissement de la langue de glace depuis le petit âge de glace : celle-ci est estimée en moyenne à 70 et au maximum 160 mètres selon les secteurs. Ces estimations correspondent toutefois à une vision a minima : on ne peut exclure qu'une partie des héritages glaciaires ait été remaniée (cas d'une érosion sur la moraine dans le cas présent). Une ablation de quelques mètres de matériaux morainiques est possible dans ce type de contexte ce qui, rapporté à l'épaisseur du glacier, suggère une marge d'erreur de la simulation de l'ordre de 3 à 4%.

Par ailleurs, des cartes topographiques au 1 : 20 000 ou au 1 : 25 000 permettent également des reconstitutions géométriques suffisamment précises pour les anciennes surfaces glaciaires. Dans le cas des Alpes françaises, des cartes levées lors de la décennie 1920 par le Service topographique des armées, puis lors de la décennie 1970 par l'IGN, peuvent donner lieu à la réalisation de MNT. Des comparaisons diachroniques ont ainsi été effectuées sur certains glaciers du massif des Écrins. Dans le cas des MNT réalisés à partir des cartes établies en 1928, l'erreur RMSE (assimilable à la marge d'erreur verticale) est de 5,5 mètres, tandis qu'elle atteint 7,5 mètres dans le cas de la carte de 1975, 7 mètres à partir des points de la BD Topo de 2003. Cette augmentation de la marge d'erreur est notamment due au fait qu'en 1920 les topographes cartographiaient les courbes de niveaux suivant une équidistance de 10 mètres, contre 20 actuellement. Néanmoins, ces marges d'erreur restent acceptables pour quantifier les variations d'épaisseur des glaciers, comprises en moyenne entre 60 et 80 mètres dans les deux cas présentés ici.

3.4 Signification des données acquises à l'échelle fine

Les investigations de terrain, les cartes géomorphologiques ou encore les MNT matérialisant la topographie de surface des glaciers, permettent de s'affranchir des séries de mesures effectuées par les glaciologues. Il est ainsi possible de multiplier les études de cas et d'obtenir des ordres de grandeur concernant les changements de géométrie sur des glaciers qui n'avaient pas été étudiés jusqu'à présent (exemples évoqués des glaciers d'Arsine et de la Plate des Agneaux). Il est de même possible d'obtenir des quantifications sur un pas de temps plus vaste que celui couvert par les séries de mesures en cours. Ce travail se matérialise par des cartes diachroniques, à l'échelon d'un objet (le glacier), représentant les changements suivant deux variables : la superficie et l'épaisseur.

Les données ainsi obtenues ne permettent pas, bien sûr, de rivaliser avec la précision des mesures topographiques directes, *in situ*, effectuées par les glaciologues. Cependant, en augmentant le nombre d'objets étudiés, on offre de nouvelles possibilités pour comparer le comportement de glaciers entre eux. Il est ainsi possible de savoir si les glaciers choisis par les glaciologues pour effectuer un suivi sont représentatifs des variations glaciaires d'un secteur donné ou uniquement représentatifs… d'eux-mêmes ! En effet, en fonction de caractéristiques locales (exposition, fourniture de débris en surface du glacier, rôle des avalanches…), le comportement des glaciers peut changer sensiblement même au sein d'un même secteur. L'inertie avec laquelle les glaciers réagissent vis-à-vis des modifications climatiques peut notamment varier fortement. Or les glaciers choisis pour effectuer les suivis ont été initialement sélectionnés selon des critères d'accessibilité, et non suivant des critères de représentativité. Il est donc primordial de vérifier que ces glaciers n'ont pas un comportement atypique. Par ailleurs, la multiplication des objets étudiés offre la possibilité de produire de véritables synthèses régionales des variations glaciaires.

4 La cartographie à échelle régionale des variations glaciaires

Cartographier et synthétiser les variations glaciaires à l'échelle régionale permet de répondre à deux attentes scientifiques. En fournissant, à l'échelon de bassins-versants entiers, des données à des hydrologues, il est tout d'abord possible d'établir des bilans hydrologiques, de modéliser le comportement des cours d'eau et notamment de comprendre comment varient (et varieront) les débits. Ensuite, les synthèses régionales ouvrent la porte aux modélisations de la relation entre glaciers et climats : il s'agit aussi bien de reconstituer les variations temporelles de paramètres climatiques (précipitations, températures, nébulosité, etc.) à partir des « signaux glaciaires », que de prévoir l'évolution de l'englacement à partir des modèles simulant les changements climatiques à venir.

Si les enjeux scientifiques d'une synthèse régionale des variations glaciaires sont réels, cette synthèse se heurte cependant à deux difficultés majeures. La première est liée au type de variable qui peut être retenu : la variation d'épaisseur d'un glacier ou sa superficie peuvent difficilement être généralisées lors du changement d'échelle pratiqué. Quel indicateur peut être retenu pour la cartographie ? La seconde difficulté est liée au mode de représentation cartographique : à une échelle régionale la géométrie glaciai-

re ne peut être respectée sur une carte nécessitant de représenter les glaciers sous forme ponctuelle. Une représentation ponctuelle est-elle satisfaisante pour cartographier, régionalement, les variations glaciaires ?

4.1 Un indicateur synthétique : l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire

La ligne d'équilibre glaciaire (LEG) est la limite théorique entre la zone d'accumulation glaciaire (zone amont du glacier où la neige s'accumule pour se transformer progressivement en glace) et la zone d'ablation glaciaire (zone aval où les pertes en glace par fusion ou sublimation sont dominantes). À la fin de la période d'ablation du glacier (l'été dans les Alpes par exemple), il est possible d'observer la zone où s'accumule en permanence de la neige en surface du glacier : la LEG coïncide alors avec la limite des neiges.

L'altitude de la LEG varie dans le temps suivant deux paramètres climatiques : les précipitations et les températures. Si les températures augmentent, alors la fusion de la glace augmente, la zone d'ablation du glacier s'étend et la LEG remonte. Si les précipitations augmentent, l'accumulation nivale sur le glacier augmente, la zone d'accumulation s'étend et la LEG s'abaisse. Au final, une élévation de la LEG se répercute par un retrait du front glaciaire, une contraction du glacier, tandis qu'un abaissement provoque une progression du front glaciaire, une extension du glacier.

Plusieurs méthodes existent pour estimer l'altitude de la LEG (Meierding 1982), la majorité d'entre elles reposant sur une reconstitution géométrique de l'extension du glacier étudié. En effet, on estime couramment que la superficie de la zone d'accumulation correspond aux deux tiers supérieurs (en terme d'altitude) de la superficie englacée, la zone d'ablation correspondant au tiers inférieur. Une carte de l'extension d'un glacier, confrontée à un canevas topographique, permet ainsi de reconstituer la distribution altitudinale de la superficie englacée et de déterminer la position de la LEG. L'altitude de la LEG, mesurée pour différents glaciers et à différentes dates, alimente une base de données spatio-temporelles, fondement de la synthèse et de la cartographie régionale.

4.2 Cartographie régionale de la LEG

À une échelle régionale, la géométrie des glaciers ne peut être représentée de façon lisible : les glaciers ont été généralisés en un semis de points, dessiné en vue de cartographier l'altitude de la LEG. Cependant cette traduction cartographique ne peut être réalisée sans difficulté car le semis varie au cours du temps, à chaque date considérée. En effet, par le jeu des confluences glaciaires en phase de glaciation, par le scindement des glaciers en phase de retrait, certains glaciers vont s'assembler pour n'en former qu'un seul, tandis que, au contraire, un glacier peut se morceler pour en « créer » plusieurs. De même, un glacier pourra tout simplement disparaître ou naître sur la période étudiée.

Cette instabilité du corpus de glaciers pose une double question. Tout d'abord, comment établir des cartes diachroniques sur des objets mouvants ? Ensuite comment quantifier, à l'aide de paramètres statistiques simples (moyenne, écart-type, etc.), la variation de la LEG ? En effet, des glaciers voisins, issus du scindement d'un unique glacier, présenteront des LEG voisines et pèseront sur le calcul de la moyenne. Ces deux problèmes peuvent être résolus en passant d'une représentation discrète de l'altitude des LEG à une représentation continue. Il s'agit donc d'interpoler les valeurs d'altitude de la LEG pour construire un champ spatial. Les climatologues, qui cherchent à recréer des champs de précipitations ou de températures, ont établi diverses méthodes d'interpolation (Joly *et al.* 2003 ; Madelin 2004) qui inspirent ici, en grande partie, les travaux effectués sur la LEG.

Le principe est, tout d'abord, de résumer les grands traits des variations spatiales, régionales, de l'altitude de la LEG. La variation spatiale de la LEG est mise en relation avec la latitude et la longitude, en ajustant un plan de régression correspondant à une image raster dans le SIG. À partir de ce plan de régression, les résidus sont estimés, correspondant à l'écart entre la valeur réelle, définie ponctuellement au niveau du glacier, et la valeur théorique, estimée par le plan. Une interpolation des résidus peut alors être effectuée par krigeage ou par IDW, donnant lieu à une seconde image raster. Si, dans le cas de températures, le krigeage semble donner les meilleurs résultats, dans le cas des champs de LEG, en revanche, la méthode IDW donne des marges d'erreur moindres (Cossart *et al.* soumis), notamment parce qu'elle permet de recréer plus finement la variabilité spatiale des LEG sans trop lisser les phénomènes locaux. Au final, la combinaison des deux images raster (plan de régression et interpolation des résidus) permet de recréer le champs d'altitude de la LEG.

Les champs obtenus à différentes dates peuvent alors être comparés entre eux pour produire des cartes diachroniques. La calculatrice raster d'ArcGIS a été, dans le cas présent, utilisée. Enfin, des statistiques permettant d'évaluer les variations de l'altitude

de la LEG peuvent être calculées, non plus à partir d'un corpus d'individus « mouvants », mais à partir de l'ensemble des pixels des cartes diachroniques (soit des images raster) créées.

4.3 Exemple de résultats acquis dans le massif des Écrins

Des investigations menées dans la vallée de la Vallouise (flanc oriental du massif des Écrins) ont permis de reconstituer les variations de superficie d'une trentaine de glaciers depuis cent cinquante ans environ (Cossart *et al.* 2006). À partir de ce suivi et d'une mise à jour effectuée récemment, l'altitude de la LEG a été estimée sur l'ensemble du secteur à quatre dates : 1880, 1928, 1975, 2003. En 1880, soixante-huit glaciers étaient identifiés ; parmi ceux-ci, quatre individus ont disparu, tandis que le scindement des soixante-quatre autres a provoqué une augmentation du nombre de glaciers (soixante-douze en 2005). Cet exemple montre tout l'intérêt de la reconstitution du champ d'altitude de la LEG pour s'affranchir de l'instabilité du semis de points.

En définitive, les estimations réalisées présentent des marges d'erreur (erreur RMSE) comprises entre 18 et 29 mètres, ce qui nous paraît acceptable car elles sont inférieures aux écarts-types calculés à chaque date. Les résultats obtenus présentent un double intérêt tant dans la quantification de la variation temporelle que dans l'interprétation spatiale des résultats. En effet, nous montrons, tout d'abord, l'accélération brutale de l'élévation de la LEG lors des trois dernières décennies. Depuis 1880, qui correspond approximativement à la terminaison du petit âge de glace, la tendance à l'élévation de la LEG ne se dément pas (+ 180 mètres), mais il apparaît que les deux tiers de cette élévation intervient depuis 1975 (+ 115 mètres). Au-delà de ces valeurs moyennes, estimées sur l'ensemble de la zone étudiée, une disparité transparaît dans le fonctionnement des glaciers. En effet, l'écart-type de l'altitude est de la LEG est de 145 mètres en 1880 et de 118 mètres en 2003. Plus précisément, les cartes diachroniques réalisées montrent clairement que les glaciers orientaux ont réagi avec davantage d'ampleur que les glaciers occidentaux. Cette interprétation spatiale est essentielle car elle permet de proposer des scenarii climatiques. La tendance est-elle liée à un réchauffement plus marqué des températures dans le secteur oriental ? Est-elle liée au contraire à une diminution des précipitations dans ce secteur ? La comparaison d'études climatologiques du début du XXe siècle (Bénévent 1926) avec les études récentes (Coursier et Isaac 1999) semble renforcer la seconde hypothèse. Aux climatologues désormais d'interpréter ces résultats en termes de modification de la circulation atmosphérique…

5 Perspectives de recherches

Ce premier aperçu sur les méthodes de cartographie des variations glaciaires n'est pas exhaustif : des résultats réalisés spécifiquement par télédétection ou photogrammétrie auraient ainsi pu faire l'objet de développements propres. Cependant les perspectives actuelles de la recherche ont pu être dégagées. À l'échelle fine, l'objectif n'est pas tant d'améliorer des méthodes de cartographie – actuellement au point – que d'élargir le nombre de glaciers étudiés : ce travail d'investigation est mené en France par différents laboratoires tels que EDYTEM (CNRS, Chambéry), le LGGE (CNRS, Grenoble) ou encore PRODIG (CNRS, Paris) ; les deux premiers travaillent essentiellement dans les Alpes du Nord ou dauphinoises (Le Roy et Deline 2009), tandis que le dernier se focalise sur les Alpes du Briançonnais (Cossart *et al.* 2006).

À l'échelle régionale, les méthodes de cartographie – et notamment d'interpolation du champ d'altitude de la LEG – restent encore perfectibles. En s'inspirant des méthodes élaborées par des climatologues travaillant aux échelles fines, il apparaît possible de prendre davantage en considération les facteurs locaux dans l'interpolation (exposition, rayonnement solaire incident, configuration topographique, etc.). Des essais sont actuellement en cours pour modéliser la relation entre l'altitude de la LEG et les différents paramètres évoqués au moyen d'une régression multiple ; l'objectif est bien sûr de réduire encore les marges d'erreur tout en élargissant les zones investiguées pour proposer, à terme, des synthèses à l'échelle de massifs entiers comme les Alpes françaises

Au-delà de ces applications, les méthodes d'analyse spatiale développées peuvent également aider à la spatialisation des changements affectant l'autre élément de la cryosphère, le pergélisol. En effet, dans ce domaine, la recherche européenne, française en particulier, se structure progressivement en réseau pour construire et échanger des bases de données recueillies localement (Schoeneich et de Jong 2008). Tout l'intérêt est, là encore, de fournir des synthèses régionales qui permettent de spatialiser les changements de répartition du pergélisol en interpolant le phénomène entre les mesures ponctuelles.

Grâce à leur savoir-faire méthodologique spécifique, couplant cartographie et analyse spatiale à différentes échelles, les géographes participent donc activement au développement des connaissances

concernant le changement climatique et ses conséquences. Nous comprenons dès lors tout l'intérêt que nous avons à défendre cette spécificité au sein de nos formations et de nos laboratoires (Ribardière 2009), en montrant que la cartographie et les outils connexes (analyse des données, SIG, statistiques) ne sont pas de simples outils « techniques », mais de véritables méthodes dont la maîtrise enrichit et renouvelle à la fois les savoirs géographiques.

Remerciements

L'auteur remercie Olivier Ninot pour l'avoir invité à communiquer lors du séminaire Prodig de septembre 2009, et Antonine Ribardière pour ses remarques sur une version antérieure de l'article.

Bibliographie

Agassiz L., 1840, *Études sur les glaciers*, Soleure, Jent et Gassman.

Allix A., 1924, « Mémoire sur les observations glaciologiques, faites en Dauphiné jusqu'en 1924 », *Études glaciologiques*, t. VI, p. 1-138.

Bénévent E., 1926, *Le climat des Alpes françaises*, Paris, Office national météorologique, 432 p.

Blanchard C., 1925, « Le refuge du Sélé », *La Montagne*, n° 182, p. 129-145.

Blanchard C., 1926, « La vallée d'Entre les Aigues », *La Montagne*, n° 191, p. 101-115.

Bodin X., 2007, *Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution et évolution récente : l'exemple du massif du Combeynot (Hautes Alpes*), Université Paris-Diderot, thèse, 378 p.

Bonaparte R., 1890, « Variations périodiques des glaciers français », *Annuaire du Club alpin français*, n° 17, p. 425-447.

Bonaparte R., 1891, « Variations périodiques des glaciers français », *Annuaire du Club alpin français*, n°18, p. 482-519.

Bonin O., Rousseaux F., 2005, « Digital Terrain Model Computation from Contour Lines: How to Derive Quality Information from Artifact Analysis », *GeoInformatica*, vol.9, n°3, p. 253-268.

Cossart E., 2006, « Les conséquences de la déglaciation actuelle des milieux de montagne, de la modification des écoulements au déséquilibre des pratiques des populations locales », *in* Morelle M., dir., *Pouvoirs et dynamiques territoriales* (Grafigéo, vol. 31), p. 53-70.

Cossart E., 2008, « Reconstitution de la géométrie 3D d'un glacier disparu et modélisation des conséquences de sa disparition : le glacier durancien lors du dernier maximum glaciaire », *Revue internationale de géomatique*, n°18-1, p. 75-91.

Cossart E., Fort M., Jomelli V., Grancher D., 2006, « Les variations glaciaires en Haute-Durance (Briançonnais, Hautes-Alpes) depuis le XIXe siècle : mise au point d'après les documents d'archives et la lichénométrie ». Q*uaternaire*, n°17-1, p. 75-92.

Cossart E., Le Gall J., 2008. « Les variations récentes (1975-2000) de l'englacement dans le massif de l'Aconcagua (Mendoza, Argentine) : essai de régionalisation, perspectives de recherches et enjeux sur les usages des ressources en eau glaciaire », *EchoGéo*, n° 4, mars / mai 2008.

Cossart E., Drocourt Y., Anselme B., soumis, « Suivi de l'englacement à une échelle régionale par télédétection », *M@ppemonde*.

Coursier F., Isaac S., 1999, *Intensités de précipitations dans les Alpes : organisation spatiale du Vercors à la plaine du Pô*, Mémoire de maîtrise, Université Denis Diderot - Paris 7, 199 p.

Deplasse E., 1927, « Chronique alpine, pointe sud de la Font-Sancte », *La Montagne*, n° 205, p. 278-280.

Francou B., Vincent C., 2008, *Les glaciers à l'épreuve du climat*, Paris, Belin, 278 p.

Godefroy R., 1909, « La pointe de Cristillan », *La Montagne*, n°3, p. 173-175.
Guillemin F., 1877, « Deux mois dans les Alpes briançonnaises », *Annuaire du Club alpin français de 1876,* p. 250-288.

Joly D., Brossard T., Elvebakk A., Fury R., Nilsen L., 2003, « Temperature interpolation at a large scale : test on a small area in Svalbard », *International Journal of climatology*, vol. 23, p. 1637-1654.

Kilian W., 1901, « Commission française des glaciers, rapport sur les variations des glaciers français », *Annuaire du Club alpin français*, n°28, p. 339-370.

Le Roy M., Deline P., 2009, « Étude des fluctuations glaciaires du petit âge de glace dans le massif des Écrins : apports de la lichénometrie », *Cahiers de géographie* collection EDYTEM, 8, p. 51-64.

Madelin M., 2004, « Utilisation de l'interpolation spatiale pour estimer un alea, gélif : application aux gelées printanières du vignoble marnais de 2003 et comparaison avec les dégâts observes », dans *Journées de climatologie 2004 Nancy : la représentation spatiale des variables climatiques*, p. 67-72.

Mathieu G., Blanchard C., 1928, « Le massif des Cerces, à propos de la nouvelle carte du Service cartographique de l'armée »*, La Montagne*, n° 214, p. 258-271.

Meierding T.C., 1982, « Late Pleistocene equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range : a comparison of methods », *Quaternary Research*, vol. 18, p. 289-310.

Mougin P., 1927, « Variations historiques des glaciers des Grandes Rousses », *Études glaciologiques*, Minist. de l'Agric., t. 6, p.139-149.

Rabatel A., Dedieu J.P., Reynaud L., 2002, « Suivi du bilan de masse glaciaire par télédétection : application au Glacier Blanc (massif des Ecrins, France) entre 1985 et 2000 », *Revue de géographie alpine*, p. 99-109.

Rabatel A., Francou B., Jomelli V., Naveau P., Grancher D., 2008, « A chronology of the Little Ice Age in the tropical Andes of Bolivia (16°S) and its implications for climate reconstruction », *Quaternary Research* 70, n°2, p. 331-342.

Rabot C., 1902. « Essai de chronologie des variations glaciaires », *Bulletin de géographie historique et descriptive*, p. 1-47.

Ribardière A., 2009, « L'enseignement de la cartographie à l'Institut de géographie », *Le monde des cartes : revue du CFC*, n°201, p. 91-94.

Saussure H.-B. de, 1803, *Voyages dans les Alpes ,* Paris, Cherbeuliez.

Schoeneich P., de Jong C., 2008, « Évolution de l'environnement alpin : quel environnement alpin demain ? pour quelles activités ? », *Revue de géographie alpine*, n°96/4, p. 53-64.

Touchon R., 1910, « Massif des Cerces et de la Moulinière », *La Montagne*, n°3, p. 133-146.

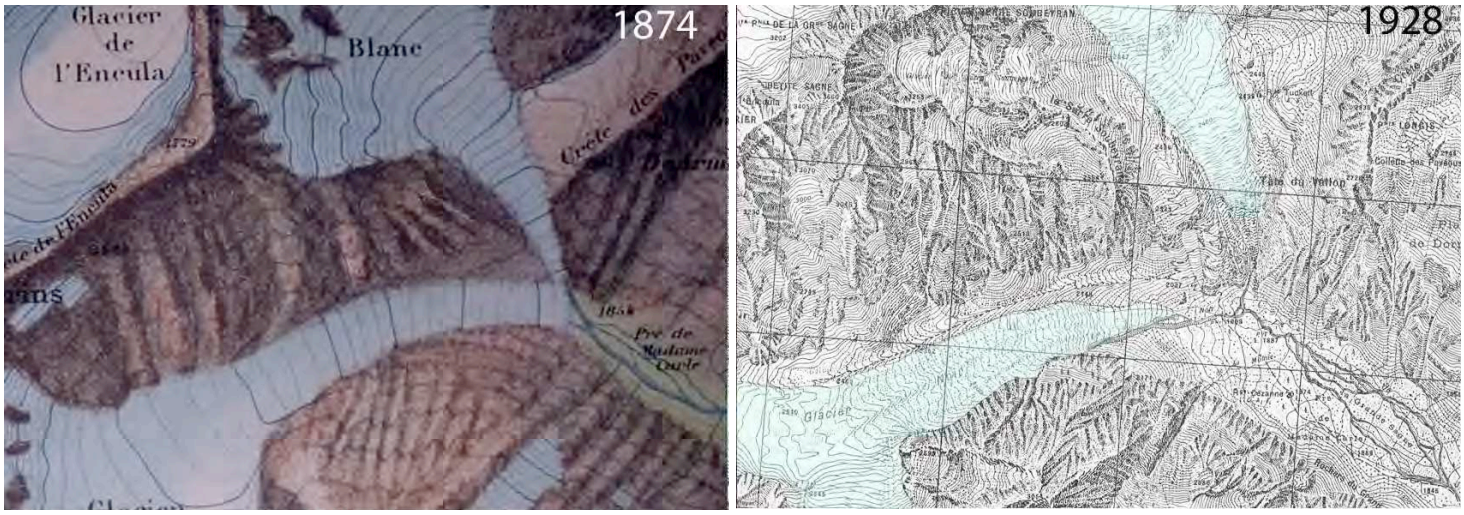

Figure 1 : Extraits de cartes d'État-Major (1874) et du Service topographique des armées (1928). Un grand soin était apporté à la figuration des états de surface du glacier (crevasses, séracs, écoulements superficiels, etc.), tandis que l'équidistance des isohypses autorise la reconstitution de MNT suffisamment précis pour établir des comparaisons diachroniques.

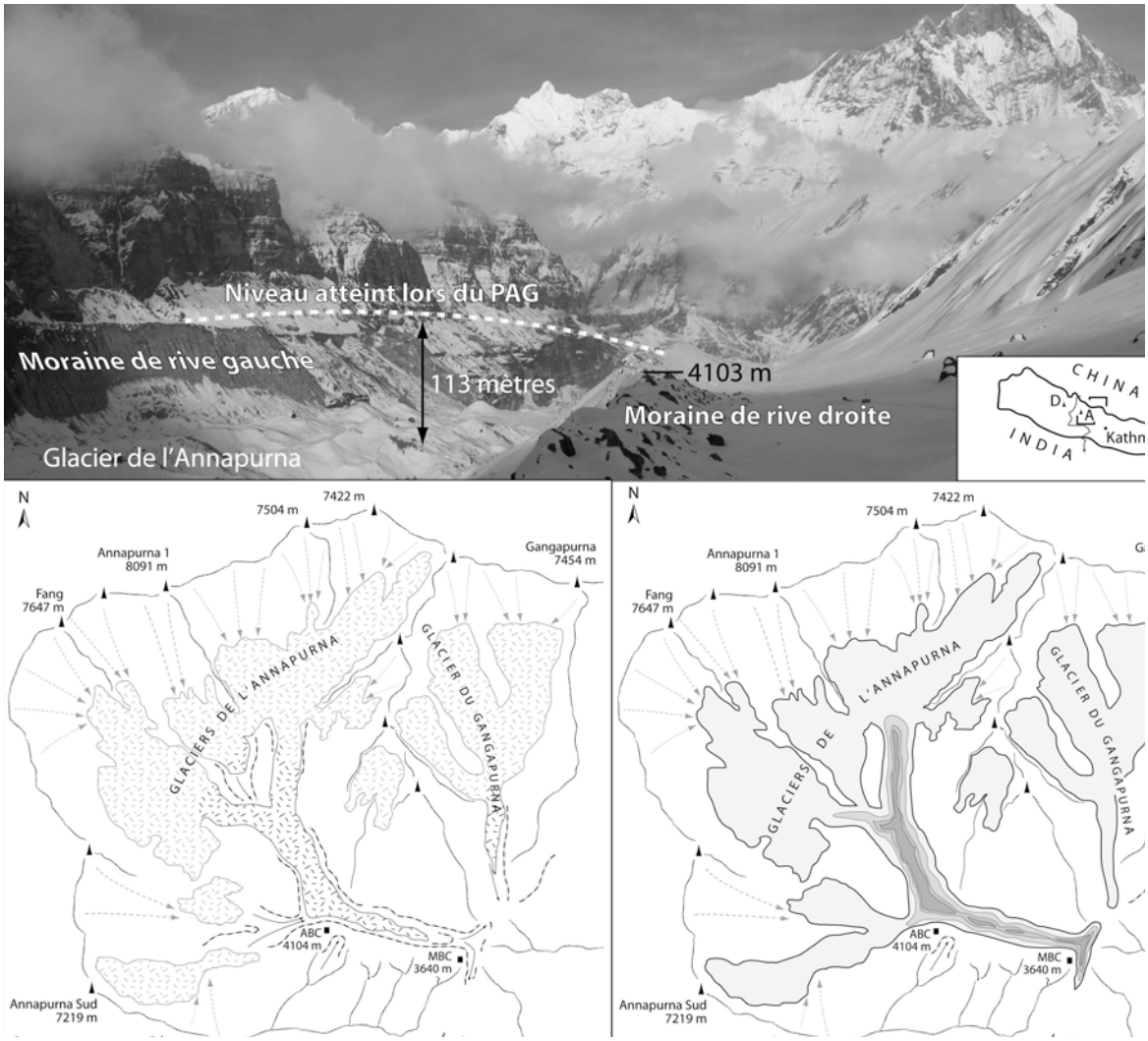

Figure 2 : Du terrain à la cartographie de la variation d'épaisseur d'un glacier (cas du glacier de l'Annapurna). En haut : Vue oblique de quelques héritages glaciaires identifiés. En bas à gauche : Carte géomorphologique des héritages glaciaires du cirque de l'Annapurna. En bas à droite : Évaluation des variations d'épaisseur de la langue de glace.

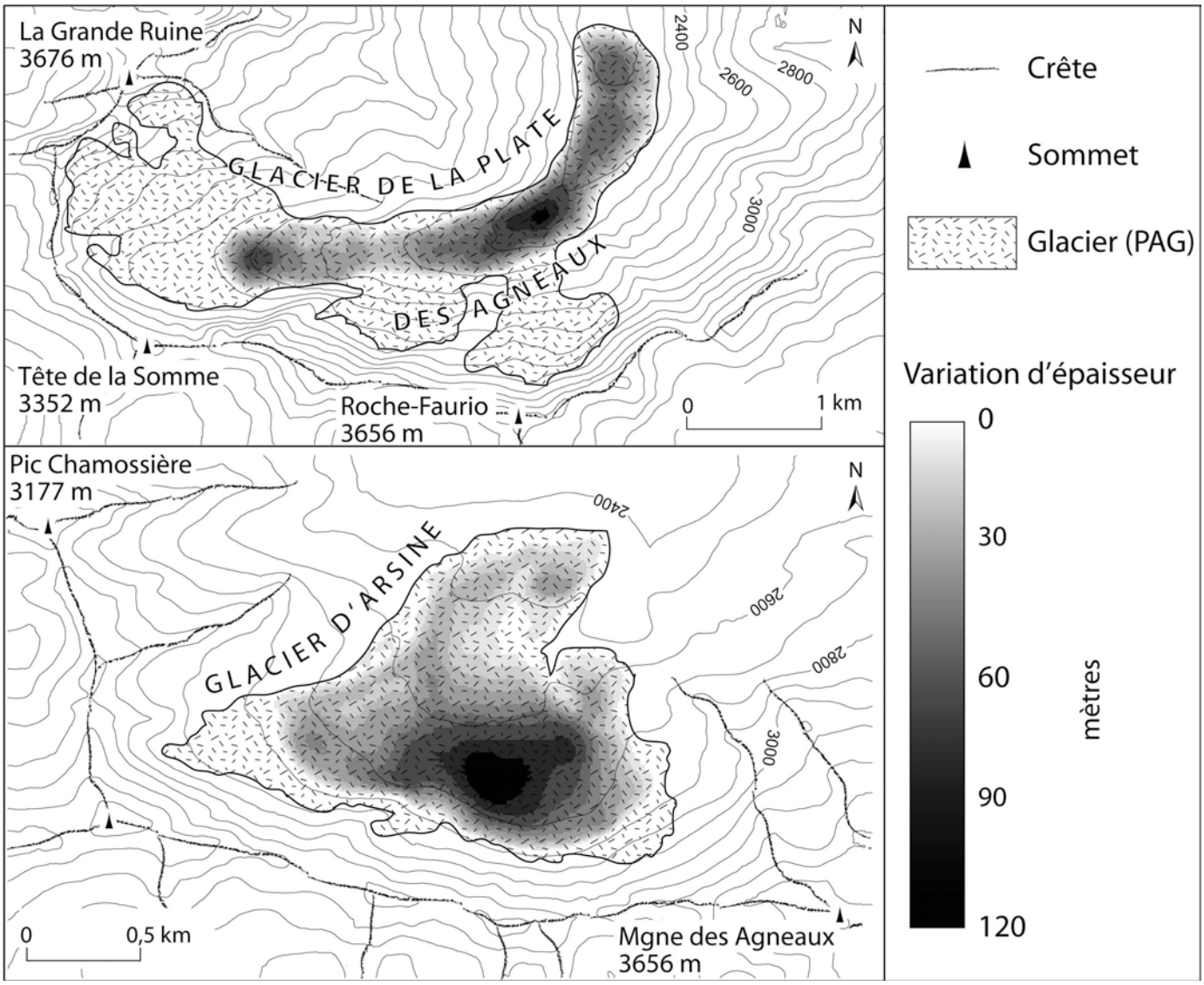

Figure 3 : Changements d'épaisseur de deux glaciers alpins, évalués par comparaison des nivellements de 1928 (Service topographique des armées) et de 2003 (IGN).
En haut : le glacier de la Plate des Agneaux, en bas : le glacier d'Arsine.

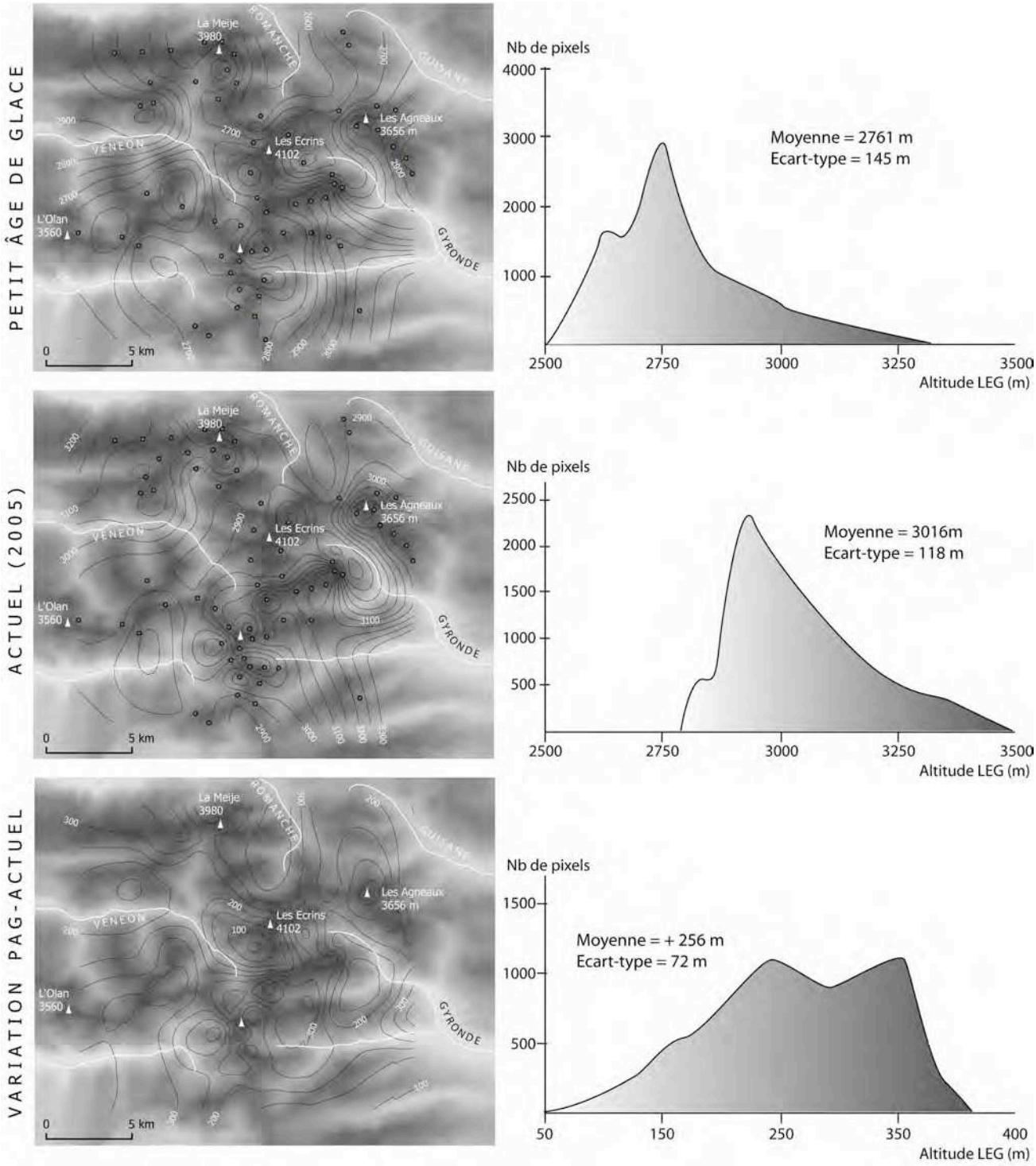

Figure 4 : Cartes de synthèse des variations de la LEG entre 1880 et 2003 (retombée orientale du Massif des Ecrins).