HAL
open science

Évolution récente de la couverture détritique des glaciers de la Région Autonome du Val d'Aoste

Camille Meyer

To cite this version:

Camille Meyer. Évolution récente de la couverture détritique des glaciers de la Région Autonome du Val d'Aoste. Géographie. 2016. dumas-01551762

HAL Id: dumas-01551762

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01551762v1

Submitted on 30 Jun 2017

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Institut de géographie alpine
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

MASTER 2
Domaine : Sciences Humaines et Sociales
Mention : Sciences du Territoire

Spécialité Recherche :
Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement

en réseau sur Rhône-Alpes

EVOLUTION RÉCENTE DE LA COUVERTURE DÉTRITIQUE DES GLACIERS DE LA RÉGION AUTONOME DU VAL D'AOSTE, ITALIE

réalisé au Laboratoire EDYTEM et à la Fondation Montagne Sûre

Mémoire soutenu le : 10 juin 2016

devant un jury composé de :

Responsable : M. Philippe Schoeneich (Professeur des Universités, UJF)
Examinateur(s) : M. Philip Deline (Maître de conférences, Université de Savoie)
M. Marco Vagliasindi Z (Géologue, Fondation Montagne Sûre)

MEYER Camille
M2 STADE
ANNEE 2015-2016

Etablissements partenaires :

ENS DE LYON · Université Joseph Fourier GRENOBLE · UNIVERSITE SAVOIE · Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE · Université Jean Monnet SAINT-ETIENNE

Notice analytique

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td colspan="2">NOM</td><td colspan="2">PRÉNOM</td></tr>
<tr><td colspan="2">Meyer</td><td colspan="2">Camille</td></tr>
<tr><td>TITRE</td><td colspan="4">Evolution récente de la couverture détritique des glaciers de la Région Autonome du Val d’Aoste, Italie</td></tr>
<tr><td rowspan="3">UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER

Institut de géographie alpine</td><td>Nom et prénom du directeur de mémoire</td><td>Stage sous convention : organisme et lieu</td><td colspan="2">Nom et prénom du maître de stage</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Schoeneich Philippe</td><td>Fondatation Montagne Sûre, Courmayeur</td><td colspan="2">Vagliasindi Marco</td></tr>
<tr><td>Laboratoire EDYTEM, Le Bourget du Lac</td><td colspan="2">Deline Philip</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>Nombre de pages</td><td>Nombre de volumes</td><td>Nombre d’annexes</td><td>Nombre de réf. bibliographiques</td></tr>
<tr><td>78</td><td>1</td><td>1</td><td>18</td></tr>
<tr><td>MOTS-CLÉS</td><td colspan="4">couverture détritique, évolution, dynamiques glaciaires, Vallée d’Aoste</td></tr>
<tr><td colspan="2">TERRAIN D’ÉTUDE</td><td colspan="2">La Vallée d’Aoste, Italie</td><td>Année universitaire 2014-2015</td></tr>
<tr><td>RÉSUMÉ</td><td colspan="4">L’évolution de la couverture détritique en lien avec l’évolution de la superficie glaciaire est une problématique actuelle. L’étude de 13 glaciers de la Vallée d’Aoste par ortho-photographies et SIG a permis de distinguer différentes réponses sédimentaires au retrait glaciaire. L’évolution de la couverture détritique dépend de l’ablation mais aussi de l’apport de matériel. Ainsi certains glaciers ont connu une augmentation de leur couverture détritique malgré le retrait glacier grâce à une élévation des débris, alors que d’autre n’ont pas compensé la perte de débris.
Les glaciers noirs n’ont pas connu de diminution de superficie remarquable grâce au rôle protecteur de la couverture détritique.</td></tr>
<tr><td>ABSTRACT</td><td colspan="4">Debris covered glacier evolution and glacier area evolution are actual interests.
The study of 13 glaciers of the Aoste Valley (Italy) conducted with GIS and ortho-photographies has allowed us to distinguish different sediment responds to glacial retreat. The evolution of debris covered glaciers depend on ablation but also sedimental dynamics. Somes glaciers have known an increase of their debris pourcentage, even if the retreat of the tong has affected low elevations debris, because debris have increase their elevation. Some others glaciers haven’t compensate the lost of debris at the tong and their debris pourcentage have decrease.</td></tr>
</table>

NOTICE ANALYTIQUE

Observations du jury

A : **Très bon mémoire**

B : **Bon mémoire mais avec des faiblesses sur quelques aspects**

C : Mémoire acceptable présentant un intérêt particulier sur certains aspects

Précisions éventuelles sur les faiblesses et les forces du mémoire :

Bon travail sur le plan méthodologique
Partie théorique trop courte

Signature P. Schoeneich

FILIERE

☐ IUP ☒ MASTER

ANNEE UNIVERSITAIRE :

Ne pas mettre de date

AUTEUR	NOM	PRENOM
	MEYER	Camille
TITRE	Evolution récente de la couverture détritique des glaciers de la Région Autonome du Val d'Aoste, Italie	

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER	Nom et prénom du directeur de mémoire	Stage sous convention : organisme et lieu	Nom et prénom du maître de stage
Institut de géographie alpine	Schoeneich Philippe	Fondation Montagne Sûre - Courmayeur	Marco Vagliasindi
		Laboratoire EDYTEM le Bourget-du-lac	Philip Deline

MOTS CLES	couverture détritique - évolution - dynamique - Vallée Aoste	
TERRAIN D'ETUDE OU D'APPLICATION	Vallée d'Aoste - Italie	PERIODE DE L' ETUDE
EMPRISE GEOGRAPHIQUE DE L' ETUDE latitude/longitude ex. N.S.E.O.		Date

RESUME

RESUME autre langue

Debris covered glaciers evolution and glacier area evolution are actual interests.
The study of 13 glaciers of the Aoste Valley (Italie) conducted with GIS and ortho-photographies has allowed us to distinguish different sediment respond to glacial retreat. The evolution of debris covered glaciers depend on ablation but also sedimental dynamics. Some glaciers have known an increase of their debris parcentage, even if the retreat of the tong has affected low elevations debris, because debris have increase their elevation. Some other glaciers haven't compensate the lost of debris at the tong and their debris parcentage have decreave.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Philip Deline sans qui ce projet n'aurait pas vu le jour. Merci de m'avoir accueillie au sein du laboratoire EDYTEM lorsque j'étais étudiante de L3, et d'avoir à nouveau accepté de travailler avec moi pour mon mémoire de M2. Ce sujet et mon stage à la Fondation Montagne Sûre n'auraient pas été possibles sans son intervention. Merci également pour sa disponibilité et ses conseils.

Merci aussi à tous les membres de la Fondation Montagne Sûre de m'avoir accueillie et hébergée pendant deux mois à la Villa Cameron. Merci de m'avoir permis de travailler dans un cadre magnifique. Je tiens à remercier plus particulièrement Marco Vagliasindi avec qui j'ai travaillé, merci d'avoir été toujours présent pour moi, que ce soit pour mon étude ou les soucis du quotidien.

Je remercie Philippe Schoeneich d'avoir accepté d'encadrer ce mémoire à l'Institut de Géographie Alpine.

Enfin un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.
Mes parents qui, malgré mes nombreux efforts d'explication, m'ont supportée sans vraiment comprendre ce qu'était la couverture détritique. Manon pour ses relectures et ses recommandations de vraie littéraire. Yann pour les cours d'Illustrator par mail. Mes camarades de master et stagiaires du « bocal » pour les moments de détente. Mes copains de Metz pour être toujours là. Et Julien pour le soutien, et tout le reste.

Table des matières

EVOLUTION RÉCENTE DE LA COUVERTURE DÉTRITIQUE DES GLACIERS DE LA RÉGION AUTONOME DU VAL D'AOSTE, ITALIE **1**

Introduction : **9**

Chapitre 1 : Présentation de l'objet de recherche **11**
1. La couverture détritique **11**
1.1 Définition 11
1.2 Origine de la couverture détritique 11
1.3 Relation au climat 12
1.4 Intérêt de l'étude de la couverture détritique 13
2. La Vallée d'Aoste **14**
2.1 Localisation et inventaire des glaciers 14
2.2 Données sur la vallée d'Aoste 15

Chapitre 2 Méthode : **17**
1. Traitement des données de 1999 et 2005 : comparaison de deux méthodes de classification **17**
1.1 Classification automatique 18
1.2 Classification supervisée 18
1.3 Sources d'erreurs de classification 20
1.4 Améliorer les classifications 21
1.5 Obtenir la couverture détritique 22
2. Comparaison des classifications **22**
2.1 Comparaison statistique 22
2.2 Comparaison cartographique 24
2.3 Choix de la meilleure méthode de classification 25
2.4 Résultats préliminaires 26
3. Méthodologie de traitement des données pour les 13 glaciers échantillons **27**
3.1 Choix des glaciers 27
3.2 Redessiner les périmètres des glaciers 28
3.3 Retravailler la classification supervisée 29
3.4 Travail sur les données en open layers 30
3.4.1 Dessiner les périmètres 31
3.4.2. Digitaliser la couverture détritique 32

Chapitre 3 : Résultats **33**
1. Evolution générale **33**
1.1. Evolution de la surface des glaciers 33
1.2 Evolution de la couverture détritique 35
1.3 Evolution de l'altitude maximale de la couverture détritique 36
2. Evolution par glacier **39**
2.1 Secteur Monte Bianco 39
2.1.1 Estelette 39
2.1.2 Lex Blanche 41
2.1.3. Miage 43
2.1.4 Brenva 45
2.1.5 Rochefort 47
2.1.6 Triolet 49
2.1.7 Pre de Bar 51
2.2. Secteur Lys 53
2.2.1 Valtournanche 53
2.2.2 Grande di Verra 55
2.2.3 Piccolo di Verra 57

2.2.4 Lys 59
2.3 Secteur Valsavaranche-Cogne 61
2.3.1 Lavacciu 61
2.3.2 Tribolazione 63

Chapitre 4 : Discussion 64
1. Classer les débris 64
1.1 Intérêt de la méthode de classification 64
1.2. Erreurs pouvant affecter la méthode mise en place 65
1.2.1 Biais dans l'échantillon sélectionné 65
1.2.2 Distinction entre couverture détritique et voile détritique 65
2. Apport d'autres méthodes pouvant améliorer la classification des débris 66
1.2 Apport des images satellites 66
1.2.1 Télédétection orientée pixel 66
1.2.2 Télédétection orientée objet 67
1.3 Apport de la 3D 67
2. Interprétation des résultats pour les 13 glaciers sélectionnés 68
2.1 Intérêt de l'altitude maximum 68
2.2 Dynamique de la couverture détritique 69
2.2.1 Estelette 69
2.2.2 Lex Blanche 69
2.2.3 Miage 70
2.2.4 Brenva 70
2.2.5 Rochefort 71
2.2.6 Triolet 72
2.2.7 Pre de Bar 72
2.2.8 Valtournanche 73
2.2.9 Grande di Verra 74
2.2.10 Piccolo di Verra 74
2.2.11 Lys 75
2.2.12 Lavacciu 75
2.2.13 Tribolazione 76
2.3 Typologie d'évolution de la couverture détritique 76
2.3.1 Les glaciers dont l'évolution de la couverture détritique et de la superficie est faible 76
2.3.2 Petits glaciers dont l'évolution de la couverture détritique est rapide 76
2.3.3 Glaciers dont la couverture détritique a suivi l'évolution inverse de la superficie 77
2.3.4 Glaciers ayant perdu en superficie et en couverture détritique 77
2.3. La dynamique de la couverture détritique : un rapport entre ablation et apport de matériel 77
2.4 Observations menées sur d'autres études 78

Conclusion 80

Bibliographie 81

Table des figures 83

Table des tableaux 86

Annexes 87

Introduction :

Ce mémoire de deuxième année de master recherche en géographie porte sur l'évolution récente de la couverture détritique des glaciers du Val d'Aoste. Il est le fruit de deux stages effectués au deuxième semestre, un stage à la Fondation Montagne Sûre (Courmayeur) et un stage au laboratoire EDYTEM (Le Bourget du Lac).
L'objectif de ce travail est de caractériser l'évolution récente de la couverture détritique de tous les glaciers de la Région Autonome de la Vallée d'Aoste. Il vient compléter les résultats d'un stage effectué à la Fondation Montagne Sûre par Agathe Payre (2013) dont l'objet était l'inventaire des glaciers de la vallée et ayant déjà évoqué la question de la couverture détritique sans pouvoir réellement l'approfondir faute de temps.

Si des études ont été menées sur la couverture détritique de glaciers en particulier, l'étude d'une région entière est moins courante, or une cartographie précise des glaciers est nécessaire à leur surveillance afin de connaitre leur réponse aux changements climatique (Kaser et al. 2006).
Dans les Alpes des étudiants de master ont ponctuellement fourni des travaux sur certains glaciers : Gébroulaz et Evettes (Perrel, 2012) ou la Mer de Glace (Martin, 2011) à partir d'images aériennes. Ces travaux ont montré une évolution inverse de la couverture détritique et de la superficie glaciaire.

Notre hypothèse de départ est donc que nous allons observer la même évolution inverse de la couverture détritique et de la superficie glaciaire pour les glaciers de la Vallée d'Aoste. De plus, étudier l'évolution de la couverture détritique à une échelle spatiale plus large qu'un seul glacier peut permettre de mettre en avant des facteurs influençant la couverture détritique tels que : l'exposition, la lithologie, le climat, … La thèse de Marie Gardent (2014) a abordé la question de la couverture détritique des glaciers des Alpes françaises et a montré une diversité de l'évolution. Notre objectif est donc à l'échelle de la Vallée d'Aoste de caractérisier la typologie d'évolution de la couverture détritique des glaciers.

Pour caractériser l'évolution temporelle, et spatiale de la couverture détritique de la Vallée d'Aoste nous allons coupler l'utilisation de données en *openlayers* et d'ortho-photographies de 1999 et 2005. L'étude se réalisera par SIG avec le développement d'une méthodologie pour travailler sur les ortho-photographies

Chapitre 1 : Présentation de l'objet de recherche

1. La couverture détritique

1.1 Définition

Les glaciers noirs sont des glaciers dont la zone d'ablation présente une couverture détritique continue (Kirkbride 2000). Cependant cette définition ne distingue pas de seuil précis de couverture détritique. Il est communément admis que pour être noir un glacier doit avoir au moins 50% de couverture détritique sur sa zone d'ablation. En réalité très peu de glaciers de notre étude correspondraient à cette définition. Nous allons donc prendre en compte la définition de Kirkbride et choisir tous les glaciers présentant une couverture détritique continue.
La couverture détritique est à distinguer du voile détritique dont la définition peut être problématique. La couverture représente une certaine épaisseur (de l'ordre de plusieurs centimètres) et surtout une texture, il n'est pas possible de voir la glace sous la couverture. Le voile est plus fin que la couverture détritique et laisse entrevoir la glace. De plus la définition de couverture détritique implique une continuité, le voile détritique est dispersé et discontinu. Il est le plus souvent la transition entre couverture détritique et glace nue.

1.2 Origine de la couverture détritique

Les débris sont une composante de la dynamique glaciaire et tous les glaciers transportent des matériaux à différents niveaux (sous, dans ou sur le glacier). Les débris sont d'origine variés et intégrés à la dynamique glaciaire de manière active ou passive (Benn et Evans 1998).
L'intégration passive de matériel rocheux est due à des processus gravitaires qui vont amener des débris à la surface du glacier : écroulement, éboulisation, avalanches, érosion des moraines. Ces processus sont résumés et localisés par la figure 1.

Les écroulements rocheux sont des phénomènes de forte intensité liés au détachement de blocs d'un volume supérieur à 100m^3 qui vont apporter à la surface du glacier du matériel (Deline 2002). Les dépôts d'écroulement sont souvent visibles à la surface des glaciers présentant une couverture détritique.

L'éboulisation des parois rocheuses entourant le glacier est un facteur d'apport de matériel important. Le processus d'éboulisation a une faible intensité avec une taille de débris plutôt petite mais la périodicité de ce processus est

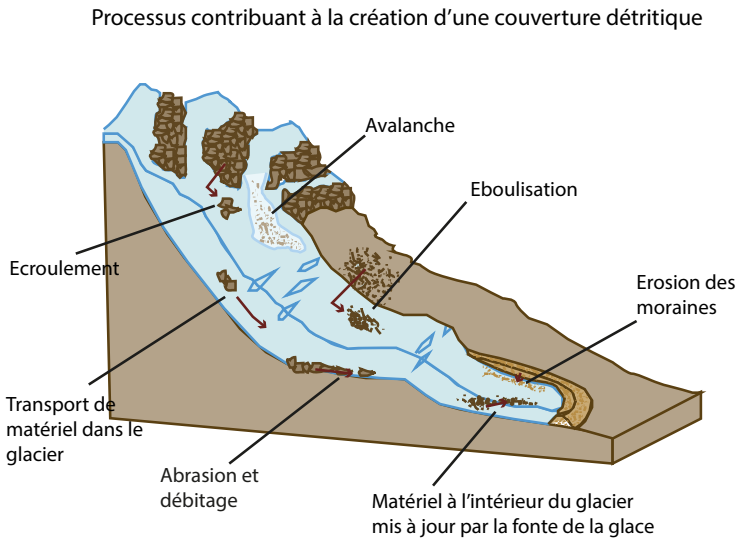


Figure 1 Processus contribuant à la création d'une couverture détritique

importante. L'éboulisation est liée à des processus de gel/dégel qui fracturent la roche et détachent du matériel.

Les avalanches de fonte se produisant au printemps peuvent transporter du matériel provenant des parois rocheuses. Lorsqu'elles se terminent sur un glacier, elles contribuent à apporter du matériel en surface.
L'érosion des moraines latérales provoquée par le retrait de la langue contribue à apporter du matériel sur la langue des glaciers possédant une couverture détritique. Cela explique aussi que l'on retrouve souvent la couverture détritique sur les bords de la langue glaciaire.
L'intégration active de matériel au glacier provient de sa capacité érosive. L'érosion du lit du glacier se fait par le biais de deux processus : l'abrasion et le débitage. L'abrasion fournit un matériel fin alors que le débitage désolidarise des fragments de roche à la base du glacier.

À ces différents processus qui touchent tous les glaciers il faut ajouter la relation au climat. En effet si du matériel peut tomber sur un glacier, il est bien souvent intégré au corps du glacier, soit par les zones de crevasses soit par le biais de l'accumulation de neige qui vient recouvrir le matériel déposé, puis cette neige se transformant en glace, les débris sont piégés dans le corps même du glacier. Les débris piégés dans le corps du glacier sont exposés par la fusion de la glace.

1.3 Relation au climat

La relation avec le climat de la couverture détritique est primordiale. Premièrement la couverture détritique contenue dans le glacier est découverte lors de la fonte de glace. Dans un contexte de réchauffement climatique, de nombreux glaciers qui étaient blancs au Petit Âge Glaciaire ont vu leur couverture détritique augmenter (D'Agata et Zanutta 2007). De plus la couverture détritique modifie la réponse au signal climatique et la dynamique des glaciers. Lorsque le bilan de masse du glacier diminue, sa couverture détritique augmente, ce qui a en retour des conséquences sur le bilan de masse (Kirkbride et Warren 1999).

Si la couche de débris a une épaisseur comprise entre 0,5 et 2 cm l'ablation augmente puis passé ce seuil l'ablation décroit de façon logarithmique (Benn et Evans 1998). L'impact sur l'ablation est dû à l'effet de la couverture détritique sur l'albédo. Les fines poussières, c'est-à-dire une couverture détritique inférieure à 2 cm, diminuent l'albédo, les rayonnements solaires sont plus absorbés qu'avec de la glace nue. La conséquence de l'augmentation de l'albédo est une accélération de la fusion par conductivité thermique.
Une couverture détritique plus épaisse a également un albédo plus faible que de la glace nue, mais l'épaisseur des débris empêche la conductivité thermique. La glace est donc isolée du rayonnement solaire ce qui diminue sa fusion (Takeuchi et al., 2000).

La couverture détritique est liée au bilan de masse parce qu'elle augmente quand celui-ci diminue, et inversement. Cependant sa présence sur le glacier tend à amoindrir la diminution du bilan de masse. Ce qui peut conduire à un cycle entre réduction du bilan de masse, augmentation de la couverture détritique, augmentation du bilan de masse, réduction de la couverture détritique, etc.

Kirkbride (2000) a établi un modèle faisant le lien entre bilan de masse, vitesse du glacier, ablation et évolution de la couverture détritique (figure 2). Ce modèle illustre cette notion de cycle entre la couverture détritique et le bilan de masse.
Quand le glacier présente un bilan de masse positif, une vitesse forte, et une ablation faible, il est dans les conditions « Transport-Dominant condition » et sa couverture détritique se contracte vers le front. Inversement, lorsque le bilan de masse est négatif, que la vitesse est faible et l'ablation forte, il est dans les conditions « Ablation-Dominant condition » et sa couverture détritique augmente vers l'amont du glacier.

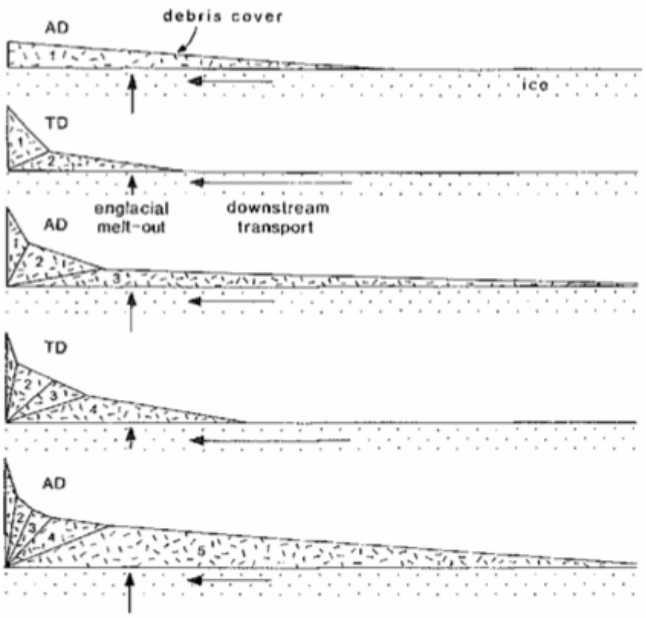


Figure 2 Modèle TD/AD de l'évolution de la couverture détritique (Kirkbride 2000)

1.4 Intérêt de l'étude de la couverture détritique

Les glaciers couverts de débris n'ont pas la même dynamique que les glaciers blancs et réagissent différemment au signal climatique. En période de retrait le bilan de masse des glaciers noirs est moins négatif que celui des glaciers blancs. Leur bilan de masse est d'ailleurs décalé dans le temps à cause d'une réponse retardée aux variations climatiques (Reynaud et Vincent, 1998). De plus la couverture détritique des glaciers noirs leur permet de se localiser à des altitudes plus basses que les glaciers blancs (Mazué, et al. 2009).

Or en période de changements climatiques il est nécessaire de comprendre comment vont répondre les glaciers parce qu'ils sont au cœur de différents systèmes.
Comme les glaciers blancs ils sont une partie du système hydrologique montagnard, stockant de l'eau et influençant le régime des torrents émissaires. Cependant contrairement aux glaciers blancs, où les eaux de fonte divisent les régimes hydrologiques des torrents en deux saisons, les glaciers noirs ont un rôle de régulateur de débit tout au long de l'année (Mattson 2000).
La couverture détritique est également le reflet des processus géomorphologiques affectant les versants qui surplombent les glaciers, notamment par le biais d'écroulement rocheux. Or ces processus sont souvent liés à une dégradation du permafrost (Guisset et Deline 2006).
Les glaciers sont générateurs de risques et comprendre leur dynamique peut permettre d'anticiper l'aléa. La vidange de lacs glaciaires ou de poches d'eau se formant à la surface ou dans le glacier, ainsi que les GLOF (*Glaciers Lake Outburst Flood*), vidange brutale de lacs de barrage morainique sont les principaux aléas liés aux glaciers couverts de débris.
En août 2014 un épisode pluvieux important à partir de 3h du matin a été suivi par un fort débit au niveau du front du Miage en fin d'après-midi. Cet épisode a occasionné de nombreux dégâts sur l'ensemble du Val Veny, en provoquant des inondations et en coupant l'autoroute en contrebas. Le fort débit ayant eu lieu plusieurs heures après le

début des précipitations, il est possible que les eaux de pluie aient été stockées à l'intérieur du glacier, et qu'elles aient eu la même dynamique qu'une vidange de poche d'eau.

La couverture détritique parce qu'elle modifie la dynamique glaciaire et parce qu'elle est liée à de nombreux autres systèmes est au cœur des enjeux actuels de compréhension des phénomènes liés au changement climatique en montagne. Une étude poussée de la couverture détritique est nécessaire pour essayer de prévoir ce que seront les glaciers de demain.

2. La Vallée d'Aoste

2.1 Localisation et inventaire des glaciers

La Vallée d'Aoste est une région située en Italie du Nord-Ouest ayant la France et la Suisse pour pays frontalier. Elle fait 3263,35 km^2 et compte environ 200 glaciers répartis selon les différentes vallées latérales de la vallée d'Aoste : Val Veny, Val Ferret, La Thuile, Valgrisenche, Rhemes, Valsavarenche, Cogne, Champorcher, Lys, Ayas, Valgrisenche, Valpelline.
Par mesure de commodité nous n'avons choisi pour notre étude que les glaciers ayant été nommés sur le World Glacier Inventory, ce qui élimine la majorité des petits glacier. L'étude de la Vallée d'Aoste a donc comporté l'étude de 87 glaciers (voir en annexe pour la liste complète des glaciers étudiés, et leur vallée d'origine).

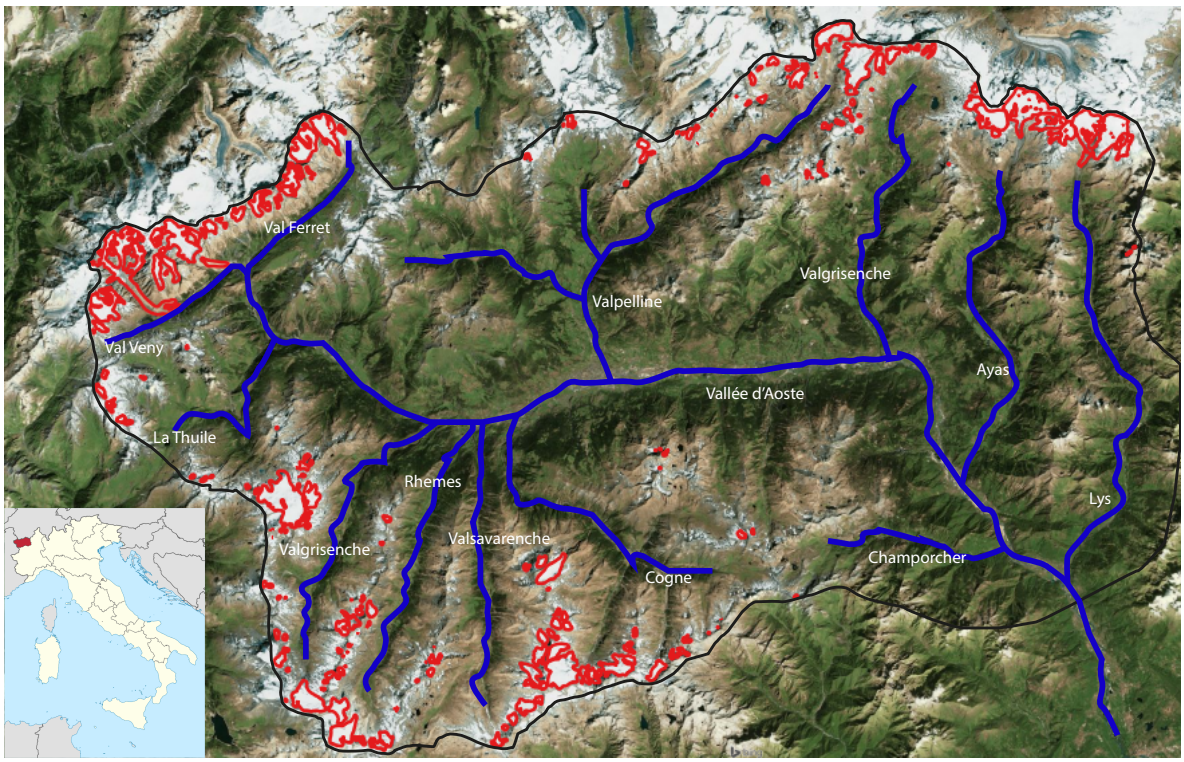


Figure 3 Localisation de la Vallée d'Aoste, de ses vallées latérales et des 200 glaciers de la région

2.2 Données sur la vallée d'Aoste

Les données utilisées pour l'étude des glaciers de la Vallée d'Aoste proviennent de missions de prises de vues aériennes pour la Région Autonome de la Vallée d'Aoste et de données en *open layers* mises à disposition par le Geoportale italien et Bing.
Pour les ortho-photographies dérivées des missions aériennes pour la Vallée d'Aoste nous ne connaissons pas les dates exactes de prises de vue des images, mais uniquement l'année. Pour l'année 2005 elles ont d'ailleurs été prises en deux fois, une première moitié puis l'autre. Pour les images en *open layers* du Geoportale italien, les dates exactes de vol sont connues et ajoutées dans le tableau 1 des données. Les données Bing exploitées en *open layers* n'ont pas non plus de date exacte et il semblerait qu'elles aient été prises durant des années différentes. Pour le secteur du Val Veny elles datent de 2011, alors que pour le secteur Lys elles sont postérieures aux données du Geoportale italien de 2012. Nous avons donc décidé, à défaut de date exacte, d'appeler tout de même ces données « 2012 », en sachant qu'elles couvrent une période pouvant aller de 2011 à 2014.

Tableau 1 Nature des données utilisées dans l'étude de la couverture détritique de la Vallée d'Aoste

Donnée	Origine	Résolution	Année	Date
Orthophoto 1999	Fondation Montage Sûre	2 mètres	1999	nc
Orthophoto 2005	Fondation Montagne Sûre	0,5 mètres	2005	nc
Orthophoto 1988	Open Layers Geoportale italien	nc	1988	07/09/88
Orthophoto 1994	Open Layers Geoportale italien	nc	1994	Juin/Sept 94
Orthophoto 2012	Open Layers Geoportale italien	nc	2012	nc
Orthophoto 2012	Images Bing	nc	2011- 2014	nc

Chapitre 2 Méthode :

1. Traitement des données de 1999 et 2005 : comparaison de deux méthodes de classification

Avant de commencer à traiter les ortho-photographies de la Vallée d'Aoste, il est nécessaire de les rassembler en groupe de photographies car la Vallée est divisée en environ 500 photos de 4 km sur 4 km. Pour grouper les photographies entre elles, la méthode la plus simple consiste à créer une mosaïque de rasters sur ArcGIS. Étant donné que nous cherchons à déterminer s'il existe une évolution de la couverture détritique par massifs, il a été décidé de regrouper les images en 7 secteurs issus des différentes vallées latérales de la Vallée d'Aoste (figure 4). Ce choix est aussi déterminé par le fait qu'il existe une certaine homogénéité des lithologies par secteur, ce qui rend la couleur des débris relativement proche et devrait faciliter la classification des pixels de l'image.

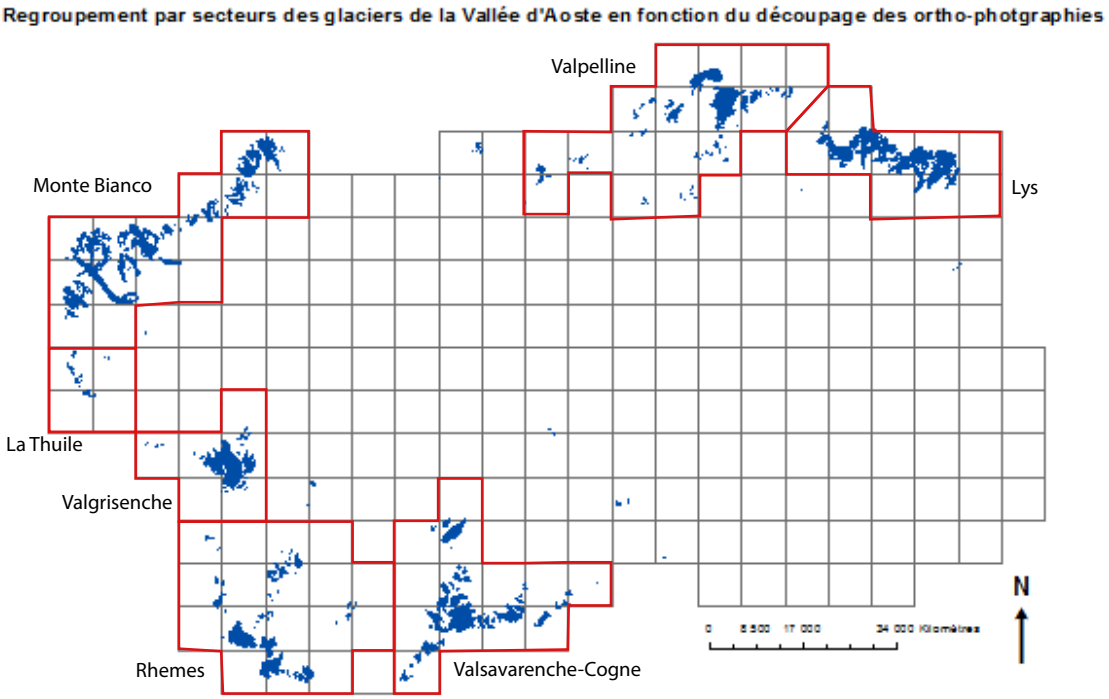


Figure 4 Regroupement par secteurs des glaciers de la Vallée d'Aoste

En effet puisque nous ne disposons que d'ortho-photographies issues d'images aériennes, nous n'avons pas de résolution spectrale autre que les bandes de couleurs rouge, vert bleu (RVB). Toute classification des pixels de l'image n'est donc que le produit de la classification des couleurs des pixels.

1.1 Classification automatique

La classification automatique provient d'une méthode développée par Mazué et al. (2009) de classification des pixels d'une image en fonction de l'histogramme des couleurs. Cette classification a été d'abord développée sur Photoshop par Mazué et al. (2009) et a servi à cartographier la couverture détritique du glacier d'Estelette en Vallée d'Aoste entre 1952 et 2006 à partir de photographies aériennes orthorectifiés. La méthode de classification en utilisant l'histogramme des couleurs a ensuite été reprise par (Payre 2013) sur ArcGIS en utilisant la fonction « *slice tool* » du logiciel.

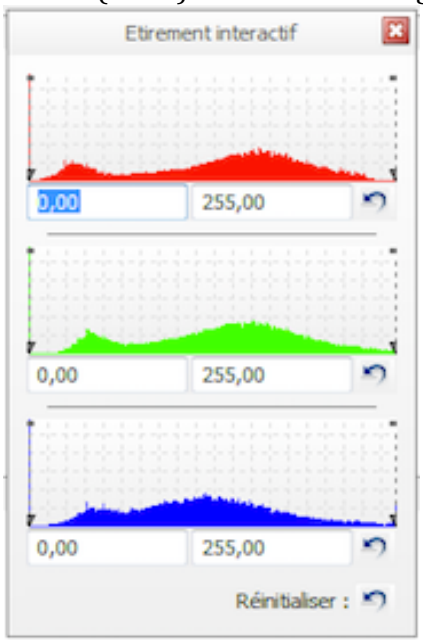


Figure 5 Histogramme des valeurs en RVB de l'ortho-photographie 1999 du secteur Lys

La figure 5 montre un exemple d'histogramme de couleur d'une image raster que nous cherchons à étudier. Chacun des pixels de l'image possède une certaine valeur dans les bandes de rouge, vert et bleu. La classification automatique à partir de la fonction « *slice tool* » permet de diviser les pixels de l'image en un nombre de classes définies. Dans notre cas nous en avons isolé 4 : débris, neige, glace, ombre. La division des pixels de l'image se fait selon les ruptures naturelles de l'histogramme. Grâce à ces quatre classes nous pouvons séparer les tons très clairs, des tons clairs, moyens et foncés. Ces tons doivent correspondre à peu près à la réalité du terrain où l'ombre sera constituée des pixels les plus foncés, les débris des pixels moyens, la glace des pixels clairs, et la neige des pixels très clairs.

C'est une méthode très rapide puisqu'il suffit simplement d'appliquer la séparation sur un raster et le logiciel détermine lui même quels pixels attribuer à quelle classe. Après la classification effectuée, si les classes ne correspondent pas à des groupes d'objets dans la réalité, les pixels peuvent être reclassés en modifiant l'amplitude de couleurs de chaque classe. La valeur de couleur d'un pixel peut être connue en utilisant l'outil « *pixel inspector* » qui donne les valeurs brut des trois canaux de couleurs.
Mazué et Payre admettent tous les deux que la méthode peut nécessiter des reclassements manuels, car certains artefacts peuvent entraver la bonne classification comme une couverture détritique composée de blocs de couleur claire pouvant être classée en glace, ou des crevasses sombres comme une couverture détritique.

1.2 Classification supervisée

Pour comparer la méthode de classification automatique qui avait déjà été utilisée pour classer la couverture détritique nous avons décidé de développer une méthode de classification supervisée sur ArcGIS. La classification supervisée sur ArcGIS a été utilisée dans des recherches sur la végétation, par exemple, mais nous n'avons pas trouvé d'application pour la couverture détritique.
La classification supervisée consiste à classer les pixels d'une image à partir de zones d'entrainement déterminées par l'utilisateur et aux moyens d'un algorithme de classification.

La première étape consiste à créer des classes grâce à l'outil « *create feature class* ». Une fois le fichier *shapefile* créé, il faut manuellement dessiner des polygones d'entraînement sur les images rasters qui correspondent aux pixels d'une classe précise et leur attribuer un numéro par classe.
Au début du développement de la méthode nous avons utilisé 4 classes comme pour la classification automatique. Pour le secteur Monte Bianco nous avons décidé d'utiliser 5 classes en séparant les débris en deux classes pour les débris foncés et les débris clairs que l'on peut retrouver sur la langue de Brenva ou du Miage par exemple. Notre hypothèse était que plus les classes regroupaient un objet similaire, plus la classification serait précise. Cependant à mesure que la méthode a été ajustée il a été décidé de ne garder que 3 classes parce que sur la plupart des images il était difficile de séparer la glace et la neige et que la séparation des débris en deux classes distinctes entrainaient plus de confusions ce qui fausse les résultats de la classification.
Les classes retenues sont donc 1 = débris, 2 = neige-glace, 3 = ombre.

Pour obtenir une bonne classification, il faut que les polygones choisis aient toute la diversité des couleurs présentes dans une même classe. De plus il faut toujours avoir plus d'un seul polygone avec des pixels de même couleur car la création des fichiers signature ne prend en compte l'amplitude de couleurs que s'il y a au moins deux polygones. Notre méthode a consisté à choisir beaucoup de polygones, mais d'une taille relativement petite pour être le plus précis possible et pour ne prendre des pixels que de la classe concernée.

Pour l'étude de l'ensemble de la Vallée d'Aoste, les polygones d'entraînement ont été sélectionnés pour chacun des secteurs déterminés en essayant de choisir au moins un polygone de chaque classe sur chacun des glaciers du groupe. Ainsi nous avons produit un fichier *shapefile* de classe par année et par secteur.
Des fichiers de classe de polygones d'entraînement ont aussi été sélectionné pour un glacier unique, sur les 13 glaciers sélectionnés afin d'étudier s'il était possible de réaliser l'étude par secteur de glaciers ou si celle-ci devait s'ancrer sur un glacier unique. Là aussi nous avons séparé l'année 1999 et 2005.

Les fichiers contenant les polygones d'entraînement sont ensuite intégrés au logiciel qui crée des fichiers de signature via le « *spatial analyst, create signature* ». Le résultat de cette manipulation permet d'analyser les polygones de manière statistique afin d'en déterminer la séparabilité. Le logiciel calcule la séparabilité en fonction des valeurs superposées de chacun des polygones, c'est-à-dire qu'il ne faut pas sélectionner un seul polygone d'une couleur spéciale, mais deux, sinon celui-ci ne sera pas pris en compte dans le calcul de la séparabilité. Cette opération produit un fichier ASCII avec la covariance de chaque classe.

La classification est faite par le biais de l'algorithme de vraisemblance maximale qui repose sur deux principes :
« - Les cellules dans chaque exemple de classe dans l'espace multidimensionnel sont réparties normalement
- Le théorème de Bayes de prise de décision » (ArcGIS Ressources)
C'est donc avant tout une méthode statistique d'attribution d'une classe à un pixel à partir de la matrice des covariances des classes dans fichiers signatures créés. Pour

chaque valeur de pixel la probabilité statistique d'appartenir à l'une ou l'autre classe est déterminée en fonction de la matrice des covariances créée par les fichiers signatures.

1.3 Sources d'erreurs de classification

Les méthodes de classification développées ci-dessus sont uniquement fondées sur la couleur des pixels de l'image raster. Cela peut générer des erreurs de classification car les pixels d'une même couleur pourraient appartenir à des classes différentes.

Ce problème est accentué pour les ortho-photographies de 1999 car la qualité des images n'est pas très bonne. La résolution de 2 mètres provoque un mélange de couleurs, et il n'est pas rare de retrouver aussi bien dans la couverture détritique que dans la glace-neige des pixels de même couleur. Il est également plus difficile de sélectionner des polygones d'entrainement précis avec une résolution spatiale moins grande, ce qui provoque des erreurs dans la séparabilité des classes si les polygones possèdent des pixels de mêmes couleurs mais n'appartiennent pas à la même classe.

Ce problème est également la source d'une mauvaise classification évoquée pour la méthode automatique, des zones autour des crevasses, qui ne sont pas toujours noires mais brun foncé et sont donc classées en débris. Sur la figure 6 il est possible de voir des zooms sur différentes zones du glacier constitué de débris ou de neige et présentant des pixels de même couleur. On remarque que les pixels de crevasses sont de la même teinte que les pixels de débris, et que certains pixels de débris sont de la même couleur que la neige et la glace. Ces pixels de même couleur mais n'appartenant pas à la même classe seront mal attribués par la classification.

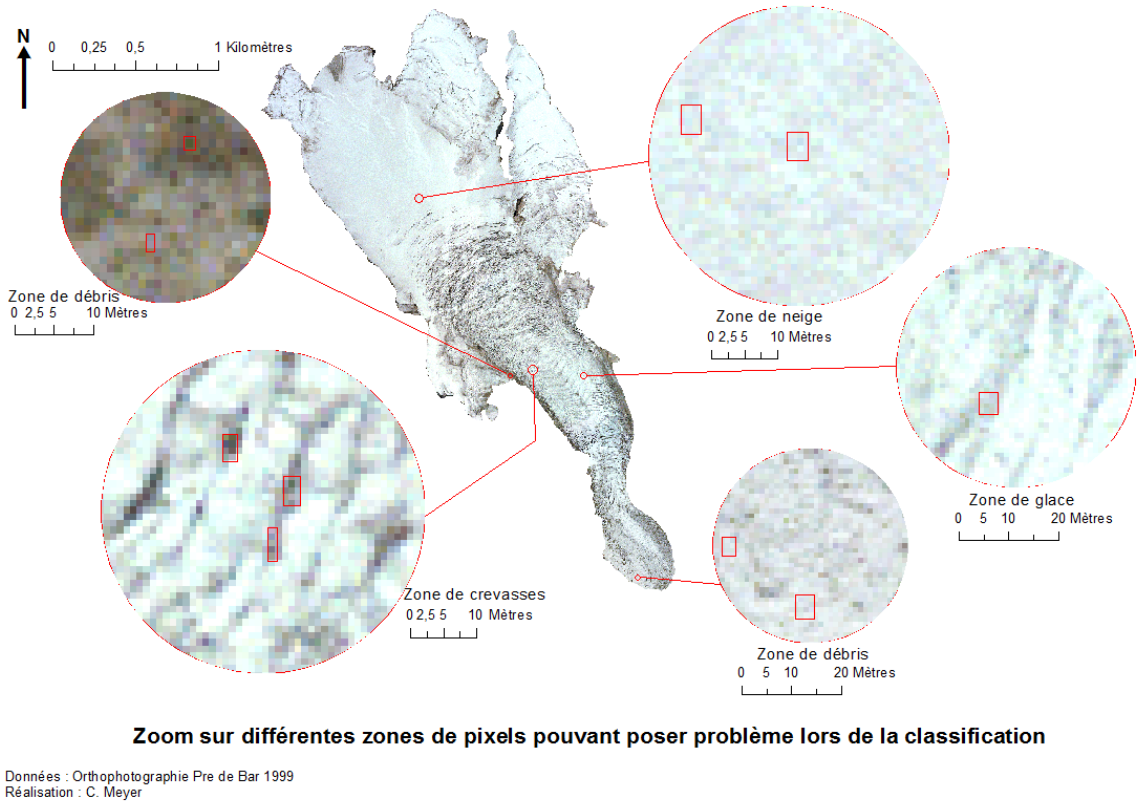


Figure 6 Pixels pouvant poser un problème d'attribution lors de la classification, à gauche des pixels sombres appartenant à des débris et des crevasses, à droite des pixels clairs appartenant à de la neige, de la glace et des débris

1.4 Améliorer les classifications

Les résultats bruts des classifications peuvent donner un effet « poivre et sel » dû à des pixels isolés au milieu d'un ensemble d'une même classe.
Cet effet peut être atténué en utilisant les outils d'amélioration des classifications de la section « *spatial analyst* ». Pour notre étude nous avons utilisé le « filtre majoritaire » qui regroupe les pixels isolés en fonction d'un algorithme de remplacement. Dans notre cas nous avons choisi comme paramètres de remplacement « *half* » qui signifie que si la moitié des pixels autour du pixel isolé appartiennent à une autre classe, ce pixel isolé sera reclassé dans la classe de pixels voisins.

La figure 7 illustre l'action de cet algorithme de reclassification. En effet avant l'utilisation de l'algorithme on peut voir qu'il y a beaucoup de pixels isolés, qui sont liés aux différentes couleurs de pixels présentés dans les sources d'erreur de classification. On retrouve donc au sein d'une classe débris, homogène à l'œil nu, de nombreux pixels plus clairs pouvant être assimilés à de la glace. L'algorithme de reclassification permet d'améliorer la classification finale et d'éliminer une partie des mauvaises classifications.

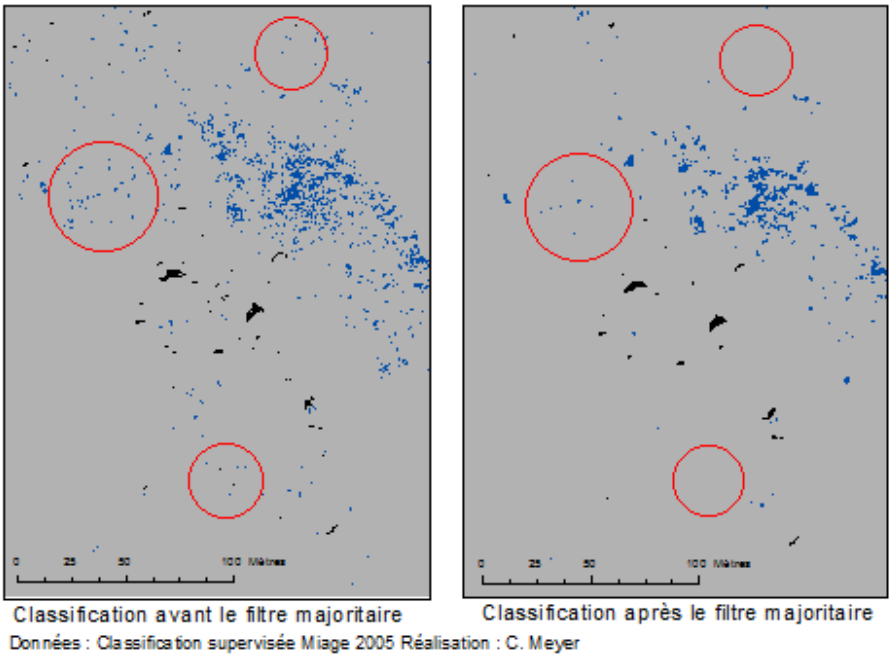


Figure 7 Résultats de l'application du filtre majoritaire sur la classification brute, l'effet "poivre et sel" est éliminé

1.5 Obtenir la couverture détritique

Le résultat de la classification et de son amélioration permet d'obtenir un fichier raster avec des couleurs représentant chaque classe. Pour isoler la couverture détritique il faut transformer le fichier raster en ficher vecteur, éliminer les polygones correspondant à la classe 2 (neige-glace) et 3 (ombre) et calculer la surface correspondant aux polygones de la classe 1 débris.
Les images raster des classifications ont été découpées en fonction de la surface de chaque glacier, ce qui permet de connaître la couverture détritique pour chaque glacier d'un secteur. Enfin la surface de chaque glacier est contenue dans le fichier *shapefile* fourni par la Fondation Montagne Sûre. On peut donc calculer le pourcentage de couverture détritique pour chaque secteur et glacier en fonction de la superficie couverte par les glaciers du secteur ou par un glacier individuellement.

2. Comparaison des classifications

Afin de déterminer la meilleure classification à utiliser nous avons décidé de les comparer entre elle.
Le premier moyen d'évaluer la qualité d'une classification est d'utiliser une méthode statistique appelée matrice des corrélations.

2.1 Comparaison statistique

La matrice des corrélations permet de déterminer si les zones sélectionnées correspondent aux zones classées par la classification. Nous avons donc décidé de

soumettre la classification supervisée à cette méthode, mais également la classification automatique en utilisant les zones d'entrainement créées pour la classification supervisée, et en les comparant avec les résultats de la classification automatique.

Pour créer une matrice des corrélations il faut faire une intersection entre le fichier *shapefile* de la classification et le fichier *shapefile* des polygones d'entrainement. Une fois cette manipulation effectuée, la table attributaire de l'intersection doit être importée sous Excel afin de créer un tableau croisé dynamique ayant :

- pour lignes le champ correspondant aux polygones issus de la classification
- pour colonnes le champ correspondant aux polygones d'entrainement
- en Σ valeurs la somme des surfaces.

Les numéros correspondent à des pixels et sont répartis en fonction de la somme des surfaces. L'erreur d'omission représente les pixels d'une classe référence ayant été attribués à une autre classe lors de la classification. L'erreur de commission représente les pixels ayant été ajoutés à une classe lors de la classification mais qui appartiennent à une autre classe de référence.

Sur le tableau 2 de la classification automatique on observe que l'erreur de commission pour les débris est faible (3,9%), mais l'erreur d'omission est très forte (73,5%). Cela signifie donc que peu de pixels qui ne sont pas des débris ont été ajoutés à la classe débris par la classification automatique, alors que de nombreux pixels débris ont été attribués à d'autres classes. Les pixels débris manquants ont été majoritairement attribués à la classe neige, et dans une moindre mesure à la classe glace. Cela explique la forte erreur de commission des classes neige et glace. Le résultat de la classification aura donc moins de débris que l'image réelle.

Tableau 2 Matrice des confusions de la classification automatique du secteur Valsavarenche-Cogne 2005

		Catégories produites par la classification					
		Débris	Neige	Glace	Ombre	Total	Erreur d'omission
Références choisies pour les polygones d'entrainement	Débris	246	505	178	0	929	73,5%
	Neige	0	4	0	0	4	0%
	Glace	0	4	15	0	19	21,1%
	Ombre	10	0	2	28	40	30%
	Total	256	513	195	28	992	
	Erreur de commission	3,9%	99,2%	92,3%	0%		

Tableau 3 Matrice des confusions de la classification supervisée du secteur Valsavarenche-Cogne 2005

Catégories produites par la classification							
Références choisies pour les polygones d'entrainement		Débris	Neige	Glace	Ombre	Total	Erreur d'omission
	Débris	2767	0	142	15	2924	5,4%
	Neige	0	1202	331	0	1533	21,6%
	Glace	8	43	1328	0	1336	0,6%
	Ombre	190	0	0	144	334	56,9%
	Total	2965	1202	1801	159	6128	
	Erreur de commission	6,7%	0%	26,3%	9,4%		

La comparaison de la matrice des corrélations de la classification automatique avec la matrice des corrélations de la classification supervisée (tableau 3) montre que les erreurs d'omission et de commission sont moindre pour la classification supervisée, avec respectivement 5,4% et 6,7% d'erreur.

D'une manière générale les résultats statistiques de la classification supervisée sont meilleurs, même s'il existe une confusion entre la glace et la neige, et l'ombre et les débris. Pour pallier la confusion de la glace et de la neige que nous avons observé sur tous les secteurs, nous avons décidé de changer le nombre de classes et de rassembler neige et glace en une même classe. De même pour le secteur Monte Bianco nous avions d'abord décidé d'utiliser 5 classes en séparant les débris en deux classes différentes comme expliqué en partie 1.2 . Les résultats statistiques montrent que la méthode est plus juste lorsque les débris sont rassemblés en une même classe. La matrice des corrélations de la classification supervisée à 3 classes montre des erreurs de commission et d'omission plus faibles que celle à 4 classes.

2.2 Comparaison cartographique

Si les résultats de la méthode statistiques permettent de donner une indication sur le classement des zones d'entrainement par rapport à la classification finale, ils ne sont le reflet que du classement de certains polygones d'entrainement. Cela signifie que même si les résultats statistiques sont bons, la classification n'est pas forcement conforme à la réalité de l'image car les statistiques ne prennent pas en compte toute l'image.

La comparaison cartographique et visuelle des deux méthodes de classification permet de se rendre compte des erreurs de classification sur l'ensemble du glacier étudié. La figure 8 montre les résultats de la classification automatique et supervisée pour le glacier Piccolo di Verra en 2005. Sur l'ortho-photographie on peut voir que la langue est couverte de débris. Or la méthode automatique classe la majorité de la langue en glace, alors que la méthode supervisée la classe en débris. De plus la moraine médiane est bien plus petite dans la classification automatique qu'elle ne l'est dans la réalité et dans la classification supervisée. D'une manière générale la classification automatique a diminué la présence réelle de débris car elle ne prend en compte que les débris de couleur foncée, les clairs étant attribués à de la glace. La comparaison visuelle confirme

les résultats de la comparaison statistique, la classification automatique omet une bonne partie des débris réels, alors que la classification supervisée est plus proche de la réalité.

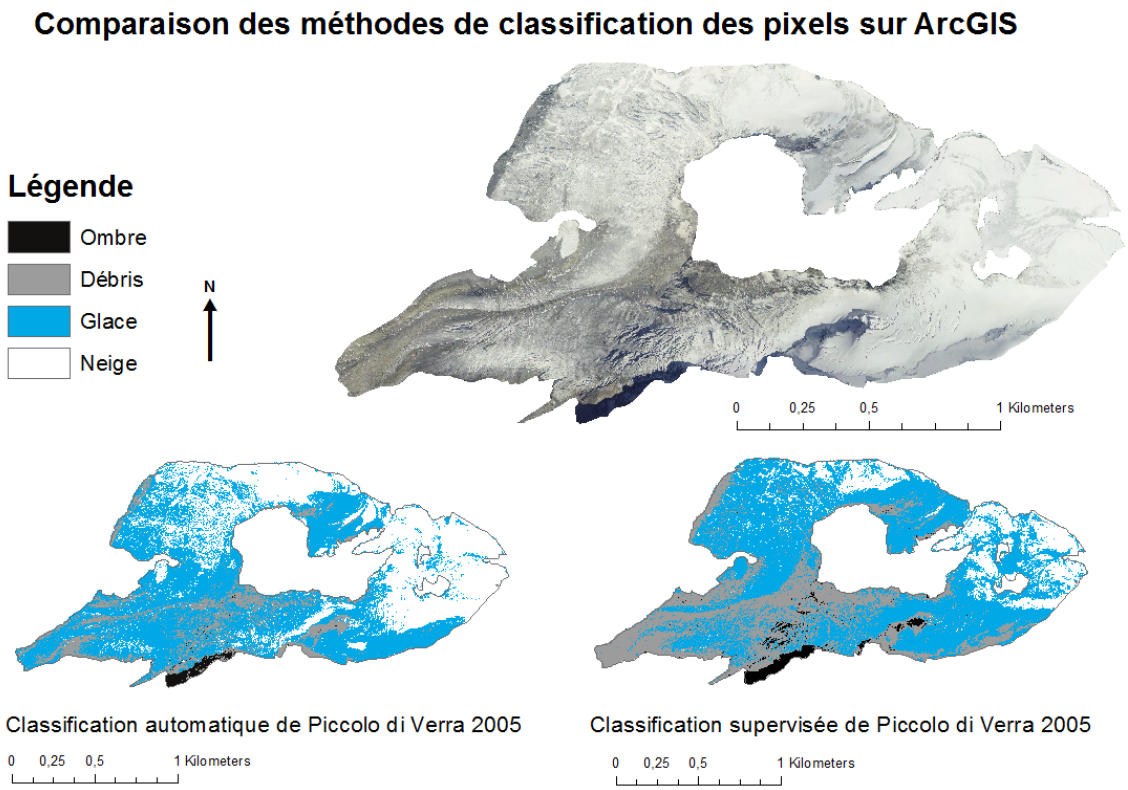


Figure 8 Comparaison des méthodes de classification de pixels (automatique et supervisée) sur ArcGIS

2.3 Choix de la meilleure méthode de classification

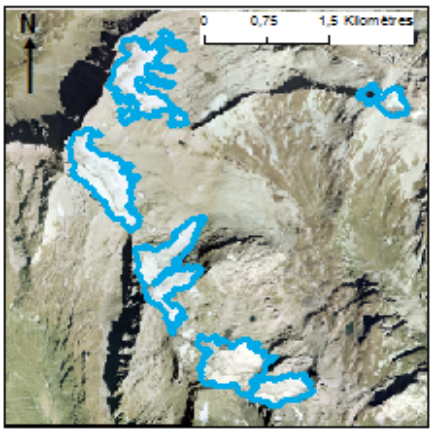
Compte tenu des résultats statistiques et cartographiques, il semble que la classification automatique ne soit pas aussi bonne que la classification supervisée.
En effet la classification automatique sépare les pixels selon les ruptures naturelles de l'histogramme. Or nous avons remarqué qu'une même classe peut avoir des couleurs de pixels très différentes, ce qui provoque des erreurs de classifications.
De plus il y a peu de contrôle sur la classification automatique, même si l'on peut choisir l'intervalle de séparation des classes, un pixel de même couleur qu'il appartiennent aux débris ou à de la glace aura les mêmes valeurs en rouge, vert et bleu. La méthode supervisée introduit un algorithme de classification qui calcule la probabilité d'appartenance à une classe de chaque pixel à partir des zones d'entrainement sélectionnées.
Cette méthode permet donc d'obtenir des résultats statistiques et cartographiques de meilleure qualité que la méthode de classification automatique, bien qu'elle ne permette pas un résultat de classification parfait et qu'elle doive être retravaillée manuellement.
Nous avons donc décidé de retenir la classification supervisée plutôt que la classification automatique pour l'étude de la couverture détritique en Vallée d' Aoste.

2.4 Résultats préliminaires

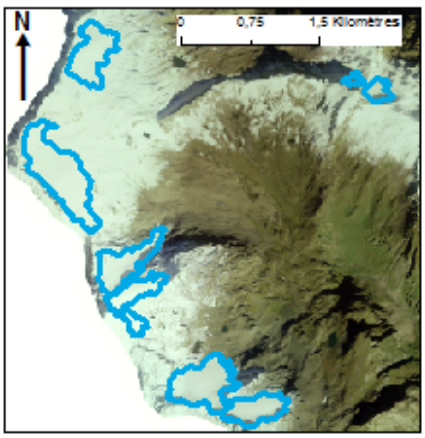
Tableau 4 Evolution de la couverture détritique des secteurs de la Vallée d'Aoste obtenue par classification supervisée

Secteur	Pourcentage de couverture détritique en 1999	Pourcentage de couverture détritique en 2005
Lys	15 %	19 %
Monte Bianco	39 %	31%
Rhemes	19%	33%
Valsavaranche-Cogne	31%	42%
Thuile	49%	0%
Valgrisenche	10%	2%
Valpelline	26%	21%

L'étude des ortho-photographies de 1999 et 2005 par secteurs devait permettre de classer la couverture détritique de chaque glacier et de constater l'évolution par secteur et individuellement. L'étude sera biaisée si l'une des deux images n'est pas de bonne qualité.
C'est le cas pour la plupart des secteurs de nos images, qui sont soit recouverts de neige ou d'ombre en 1999 soit en 2005. Les résultats par secteurs ne peuvent donc pas être fiables car il est impossible d'étudier réellement la couverture détritique pour l'une ou l'autre des années concernées. De plus comme abordé précédemment, la classification supervisée, bien que meilleure que la classification automatique, réalise des erreurs dans l'attribution des classes. Cela signifie que les résultats de la classification brute ne sont pas corrects et qu'il faut manuellement retravailler les classifications pour éliminer les polygones n'appartenant pas à la couverture détritique.



Secteur La Thuile en 1999



Secteur La Thuile en 2005

Figure 9 Exemple d'image recouverte de neige pouvant nuire à la classification

D'une manière générale on observe que les résultats sont très fluctuants (tableau 4). Ils s'expliquent principalement par la présence de neige ou d'ombre sur l'une ou l'autre des années étudiée à l'aide des classifications. Pour le secteur Thuile les glaciers étaient totalement couverts de neige sur les ortho photographies de 2005 ce qui explique le résultat de 0% de couverture détritique. De même pour le secteur Valgrisenche en 2005 ou Rhemes en 1999. Ces résultats ne peuvent donc pas être exploités et marquent la fin de la tentative d'observation d'une évolution spatiale et temporelle de la couverture détritique sur l'ensemble de la Vallée d'Aoste.

3. Méthodologie de traitement des données pour les 13 glaciers échantillons

Afin de rediriger l'étude de la couverture détritique en Vallée d'Aoste et d'obtenir si possible des résultats exploitables, nous avons décidé de prendre certains glaciers comme exemple et de ne pas utiliser uniquement les ortho-photographies de 1999 et 2005 mais également des données en open layers de 1988, 1994, et 2012 pour compléter les résultats de 1999 et 2005.

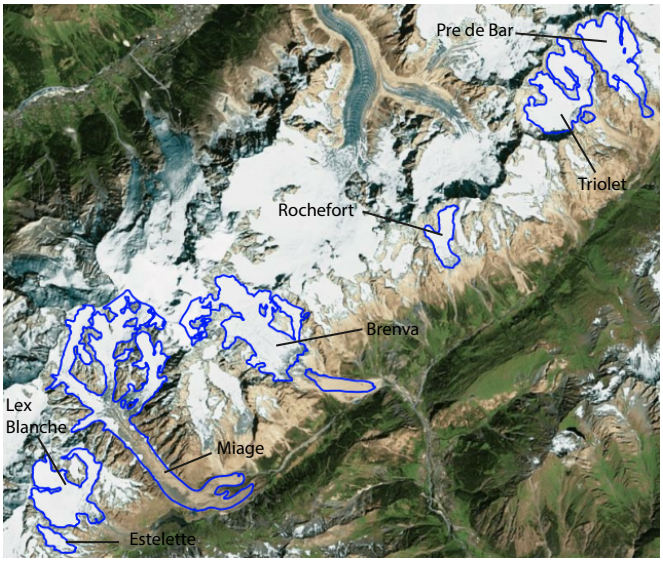


Figure 10 Localisation des glaciers sélectionnés dans le secteur Monte Bianco

3.1 Choix des glaciers

Dès lors que l'étude par secteur sur deux années n'a plus été possible il a fallu choisir des glaciers sur lesquels fonder l'étude. Ce choix a été guidé par la qualité des images de 1999 et 2005. Tous les glaciers qui présentaient une évolution de couverture détritique ou dont la couverture était visible et pour qui les images n'étaient pas altérées par de la neige ou de l'ombre ont été sélectionnés. Sur tous les secteurs de la Vallée d'Aoste nous n'avons pu garder que les glaciers suivants :

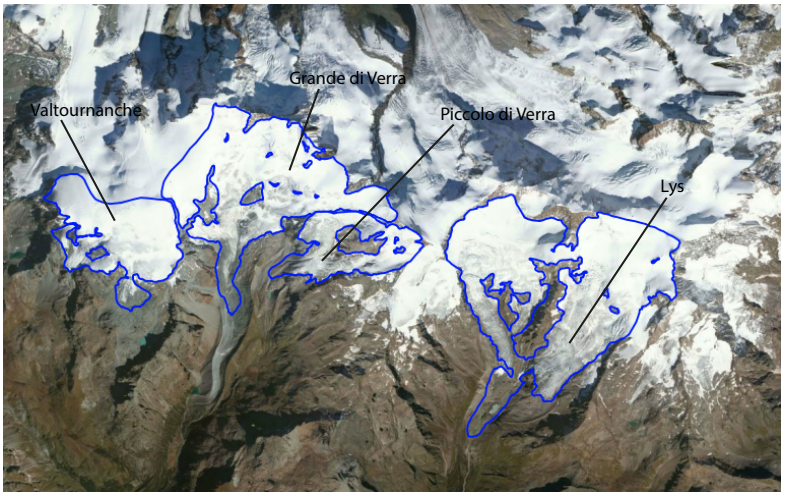


Figure 11 Localisation des glaciers sélectionnés dans le secteur Lys

Secteur Monte Bianco (figure 10) :
- Estelette
- Lex Blanche
- Miage
- Brenva
- Rochefort
- Triolet
- Pre de Bar

Secteur Lys (figure 11) :
- Valtournanche
- Grande di Verra
- Piccolo di Verra
- Lys

Secteur Valsavarenche-Cogne (figure 12):
- Lavacciu
- Tribolazione

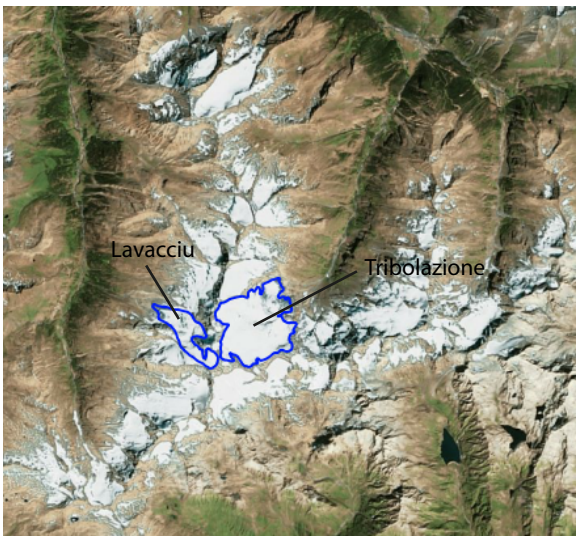


Figure 12 Localisation des glaciers sélectionnés dans le secteur Valsavarenche-Cogne

Il aurait été idéal d'avoir au moins un glacier par secteur mais malheureusement des secteurs intéressants comme Rhemes ou Valpelline étaient masqués pour l'une ou l'autre des deux années et aucun glacier n'était exploitable pour les deux années. La représentativité de cet échantillon par rapport à la vallée d'Aoste est discutable mais il a été forcé par la qualité des images disponibles pour 1999 et 2005.

3.2 Redessiner les périmètres des glaciers

Après avoir décidé de recentrer l'étude sur 13 glaciers afin de la rendre plus valide, nous nous sommes rendus compte que les périmètres des glaciers déterminés par la Fondation Montagne Sûre et utilisés jusqu'alors n'étaient pas forcément conformes à la réalité, ce qui pouvait biaiser l'étude. Les périmètres de tous les glaciers sélectionnés pour 1999 et 2005 ont donc été retracés en essayant d'être le plus juste possible. Cette tâche n'est pas aisée car il est difficile de distinguer là ou le glacier commence de là où les dépôts ne font pas partie de la couverture détritique. Le remaniement des périmètres a surtout eu lieu pour la langue glaciaire, la partie supérieure du bassin versant étant difficile à distinguer nous avons décidé de la considérer comme correcte et ne l'avons pas retouchée.
La figure 13 présente l'exemple de remaniement du périmètre pour le glacier de Piccolo di Verra. En 1999 comme en 2005 il nous est apparu que la langue glaciaire déterminée par la FMS était plus petite que la taille réelle de la langue. En effet il est possible de voir des crevasses et formes glaciaires qui prouvent que le périmètre n'est pas juste.

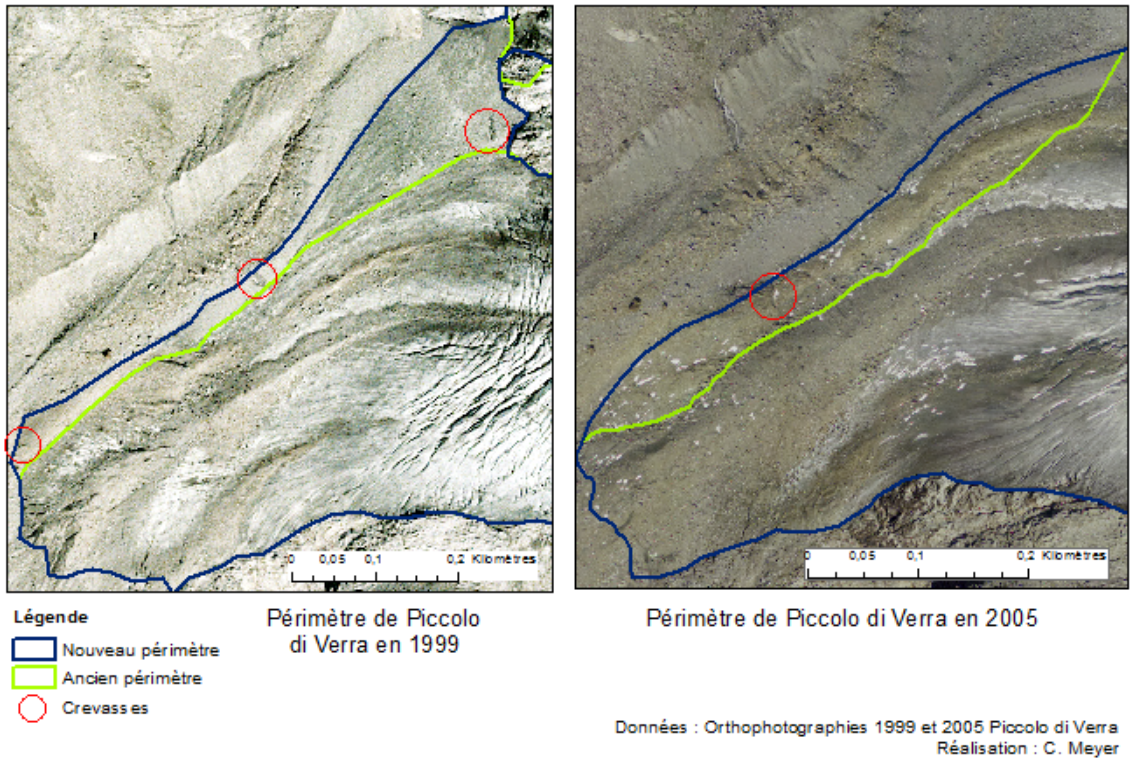


Figure 13 Périmètre de Piccolo di Verra avant et après avoir été retracé et justifications du nouveau tracé

Pour le glacier de Triolet, figure 14, en 1999 des zones humides montrent qu'il y a une activité de fonte de glace sous les cailloux que l'on peut observer. Nous avons donc décidé d'agrandir le périmètre. Pour 2005 c'est toute la partie détachée du glacier qui a été éliminée par les périmètres de la FMS. Il a donc été décidé de l'inclure au glacier, car celle-ci peut être alimentée par les chutes de séracs du glaciers, et d'autres glaciers de l'étude ont une langue détachée qui a été conservée dans les périmètres des glaciers comme le glacier de Brenva.

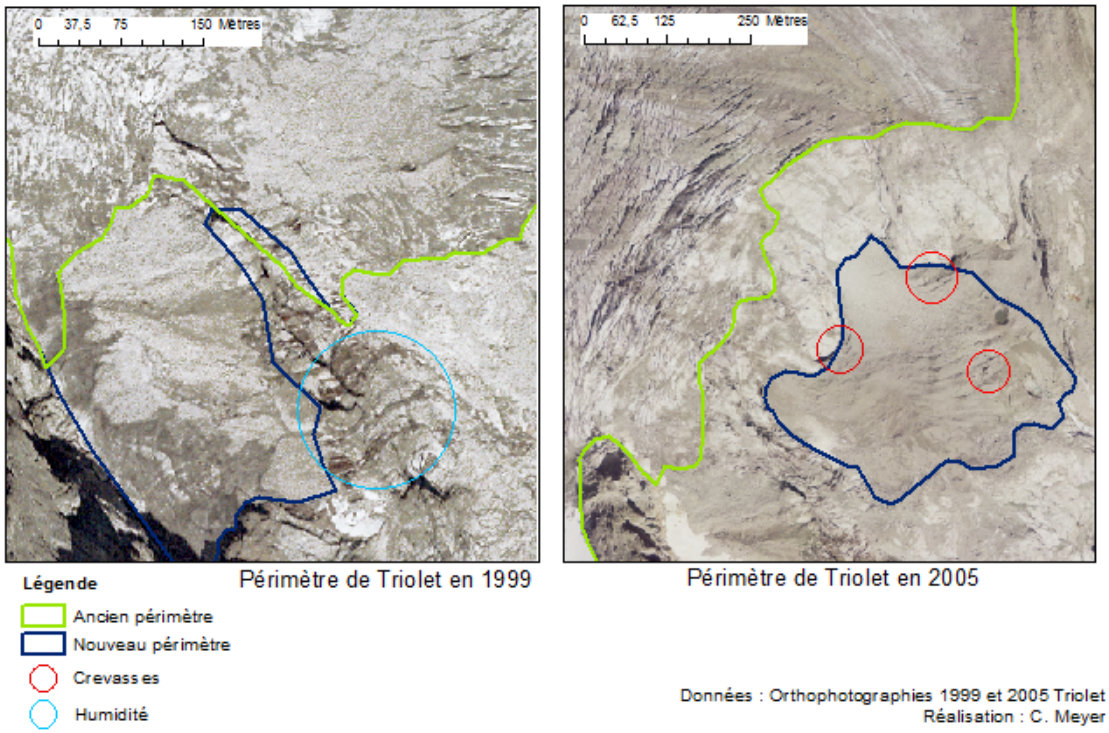


Figure 14 Périmètre de Triolet avant et après avoir été retracé et justifications du nouveau tracé

3.3 Retravailler la classification supervisée

Evoqués précédemment, les résultats de la classification supervisée concernant la couverture détritique sont bruts et doivent être retravaillés pour éliminer les polygones n'appartenant pas à de la couverture détritique. La majorité de ces erreurs proviennent des zones de crevasses. Il faut donc sélectionner les mauvais polygones et les effacer de la table attributaire, ou les découper puis les effacer s'ils sont reliés à des polygones de couverture détritique. Cette opération est nécessaire pour obtenir des valeurs justes.

La figure 15 montre le résultat de la classification supervisée des débris pour le glacier du Lys. Avant le remaniement manuel de la classification, les débris représentent 21% de la surface du glacier. Or si l'on regarde plus précisément, la classification inclus des « débris » dans de nombreuses zones du bassin d'accumulation et sur les crevasses. Lorsque que tous les polygones mal classés sont éliminés la part de débris n'est plus que de 11%. Cette valeur est plus proche de la réalité c'est pourquoi il a fallu retravailler les classification supervisées faites pour les images de 1999 et 2005 et ce pour chacun de glacier sélectionnés.

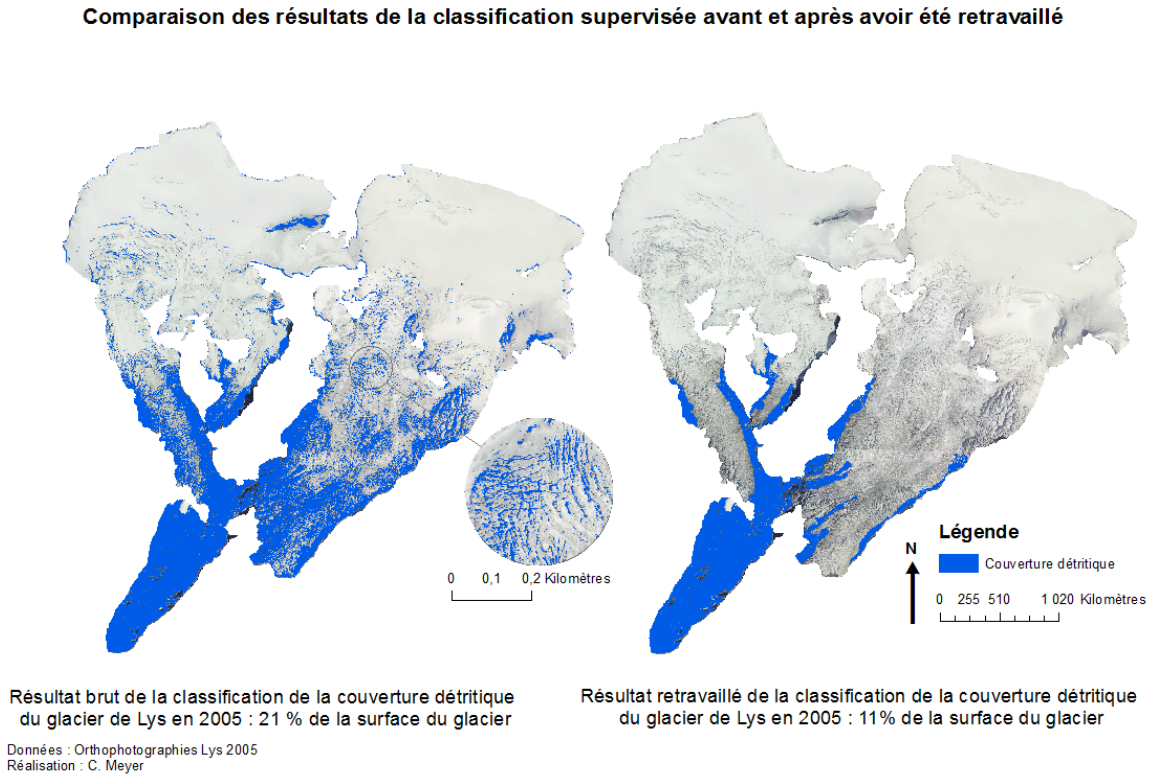


Figure 15 Elimination des polygones mal classés sur la classification supervisée du glacier de Lys en 2005

3.4 Travail sur les données en *open layers*

Pour compléter les données d'évolution de la couverture détritique pour les 13 glaciers sélectionnés entre 1999 et 2005 nous avons décidé d'utiliser les données mises à disposition par le Geoportale Italien et pouvant être chargées dans QGIS en tant que données WMS. De plus il est possible de traiter sous QGIS les images aériennes de Bing. Le travail à partir *d'open layers* se fait manuellement, parce qu'il n'est pas possible de traiter les images. On ne peut donc pas appliquer les méthodes de classification, et il faut digitaliser manuellement les contours des glaciers et de la couverture détritique.
Pour les images de 2012, étant donné que nous avions à disposition les images du Geoportale italien et de Bing, nous avons décidé de sélectionner pour chacun des glaciers sélectionnés celle pour laquelle la visibilité était la meilleure (voir tableau 5).

Tableau 5 Origine des données de 2012 utilisée pour chaque glacier

Nom du glacier	Donnée utilisée
Pre de Bar	Ortho 2012 Bing
Triolet	Ortho 2012 Bing
Tribolazione	Ortho 2012 Bing
Valtournanche	Ortho 2012 Bing
Lex Blanche	Ortho 2012 Geoportail italien
Piccolo di Verra	Ortho 2012 Bing
Miage	Ortho 2012 Geoportail italien
Brenva	Ortho 2012 Geoportail italien
Grande di Verra	Ortho 2012 Bing
Lavacciu	Ortho 2012 Bing
Lys	Ortho 2012 Bing
Estelette	Aucune
Rochefort	Aucune

3.4.1 Dessiner les périmètres

Tout comme pour 1999 et 2005 il a fallu dessiner les périmètres des glaciers pour 1988, 1994 et 2012. La méthode a consisté à prendre le périmètre le plus proche spatialement de l'année que l'on veut étudier et à modifier le fichier *shapefile* pour obtenir le nouveau périmètre. Cette méthode est la plus simple car nous ne voulions pas modifier la partie supérieure du bassin d'accumulation des glaciers. En effet à cause de la qualité des images et de leur ortho-rectification, de nombreuses zones de déformations sont apparues sur les images les plus anciennes, notamment au niveau des fortes pentes. Ainsi pour minimiser les erreurs, seules les parties inférieures des glaciers ont été retracées. Les périmètres dessinés pour 1988, 1994 et 2012 peuvent comporter une marge d'erreur car il est parfois difficile de distinguer réellement les zones de glacier couvert et les zones n'appartenant pas au glacier. Des indices comme ceux trouvés pour les périmètres de 1999 et 2012 ont permis de déterminer les périmètres.

Cependant, étant donné que les périmètres ont été dessinés à partir des périmètres de 1999 et 2005 sans toucher à la partie supérieure il est possible de voir des incohérences de changements de périmètres au cours des années étudiés pour un même glacier. La figure 16 illustre cette marge d'erreur dûe aux périmètres donnés par la Fondation Montagne Sûre. La partie supérieure droite du glacier de Brenva est constituée de glaciers suspendus qui ne sont pas amenés à changer beaucoup. Or entre 1999 et 2005 cette zone n'a pas été tracée de la même façon.
Comme ce sont respectivement les périmètres de 1999 et de 2005 qui ont servis à tracer ceux de 1988 et 1994 et celui de 2012 il est normal que l'on retrouve des incohérences de

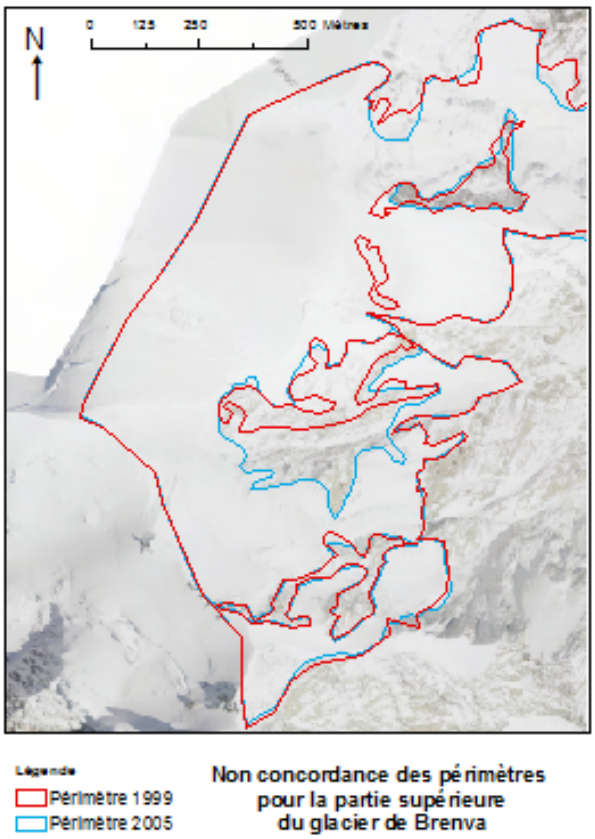


Figure 16 Problèmes de tracé des périmètres de la partie supérieure du glacier de Brenva

périmètres dans nos résultats quand nous cherchons à comparer la superficie du glacier.

3.4.2. Digitaliser la couverture détritique

Pour digitaliser la couverture détritique il suffit de créer un fichier *shapefile* et de dessiner les contours de la couverture détritique. Ce travail est moins précis que le travail de classification supervisée, mais ne nécessite pas de traitements pre- ou post-opératoire. Pour digitaliser la couverture détritique nous avons simplement observé les images. Pour certains glaciers une partie de la couverture détritique était recouverte de neige et il était possible de voir des morceaux de l'étendue de débris mais pas la totalité. Or bien souvent cette étendue était retrouvée les autres années, nous avons décidé de digitaliser un ensemble, même s'il n'était pas forcément possible de voir la totalité de la couverture détritique.

Chapitre 3 : Résultats

1. Evolution générale

1.1. Evolution de la surface des glaciers

La digitalisation des périmètres des 13 glaciers échantillon a permis d'obtenir des informations sur la surface couverte par chacun d'eux de 1988 à 2012. Pour comprendre comment se porte un glacier il faut étudier son bilan de masse, c'est-à-dire la relation entre les volumes d'accumulations, volumes d'eau ajoutés au glacier par les avalanches et précipitations, et les volumes d'ablation, volumes d'eau enlevés au glacier principalement par la fonte de la glace. Cependant pour obtenir ce type de données il faut mesurer annuellement la hauteur de neige accumulée sur une saison, et la hauteur de neige retirée.

Nous ne disposons pas de ce type de données, mais grâce à la digitalisation des périmètres des glaciers et parce que les images sont géoréférencées nous pouvons connaître la superficie des glaciers étudiés. La superficie n'est pas entièrement le reflet des changements de bilan de masse mais permet de se rendre compte du retrait de la langue glaciaire, qui peut être lié à des changements de bilan de masse.

Tableau 6 Evolution de la superficie des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012 (en km^2)

	1988	1994	1999	2005	2012
Grande di Verra	7,25	7,02	6,94	6,64	6,64
Lys	10,75	10,41	10,75	9,57	9,49
Piccolo di Verra	2,62	2,52	2,29	2,13	2,05
Valtournanche	3,98	3,91	3,82	3,58	3,42
Brenva	7,43	7,29	7,07	6,59	6,77
Estelette	0,72	0,69	0,63	0,59	0,32
Lex Blanche	3,92	3,63	3,53	3,39	3,06
Miage	10,98	10,90	10,81	10,58	10,58
Pre de Bar	3,48	3,40	3,30	3,09	1,74
Rochefort	1,17	1,10	1,08	1,08	
Triolet	4,36	4,27	4,17	3,75	3,56
Lavacciu	2,11	1,92	1,82	1,62	1,61
Tribolazione	5,58	5,50	5,42	5,10	4,92

Le tableau 6 monte que les glaciers que nous avons sélectionnés sont plutôt plus grands que la plupart des glaciers de la Vallée d'Aoste. Seul le glacier d'Estelette a une superficie de moins de 1km^2. Tous les autres font plusieurs kilomètres carrés, et les plus grands, le Miage et le Lys, ont une superficie de 10 km^2.
D'une manière générale les glaciers de notre étude voient leur superficie diminuer entre 1998 et 2012, même si la plupart d'entre eux connaissent une diminution de superficie très lente comme le montrent les courbes d'évolution de la superficie.

La diminution n'est d'ailleurs pas linéaire (figure 17), c'est le cas par exemple du glacier de Lys qui a connu une augmentation de superficie en 1999. Cependant les données montrent que cette augmentation est en réalité assez minime et est exagérée par l'échelle du graphique. Seul le glacier de Pre de Bar connaît une diminution rapide de sa superficie ce qui est remarquable en particulier entre 2005 et 2012. L'étude de la superficie de chaque glacier a été plus détaillée en partie 2.

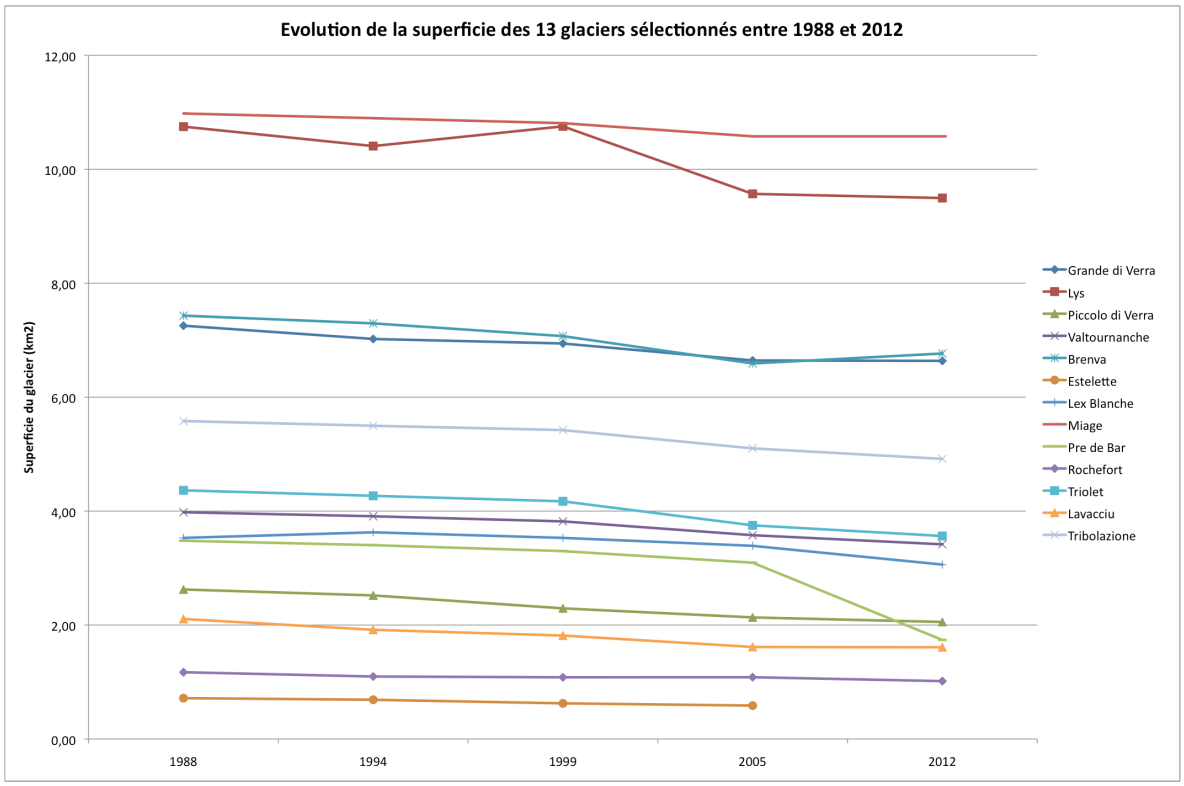


Figure 17 Evolution de la superficie des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012

1.2 Evolution de la couverture détritique

La couverture détritique doit être étudiée en fonction de la superficie de chaque glacier. En effet les valeurs absolues dépendent de chaque glacier et ne peuvent être comparée. Nous étudions donc la couverture détritique en tant que pourcentage de couverture du glacier.
Si, individuellement, chaque glacier connaît une évolution de sa couverture détritique particulière qui sera détaillée en partie 2, d'une manière générale la couverture détritique tend à augmenter entre 1988 et 2005 pour les glaciers de notre étude. Elle diminue cependant entre 2005 et 2012 pour la plupart des glaciers sélectionnés. Il n'y a pas de réelle tendance générale sur l'évolution de la couverture détritique et chaque glacier semble suivre une logique propre (figure18 et tableau 7).

Tableau 7 Evolution du pourcentage de couverture détritique des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012

	1988	1994	1999	2005	2012
Grande di Verra	6,0	3,5	5,0	7,8	7,0
Lys	6,2	6,9	7,1	10,7	7,6
Piccolo di Verra	7,7	7,8	15,6	14,7	12,5
Valtournanche	0,4	0,8	3,2	3,1	2,6
Valtournanche Voile	3,0	2,9	3,5	5,0	2,4
Brenva	17,4	18,7	30,8	20,3	17,9
Estelette	21,1	23,3	25,0	35,0	
Lex Blanche	6,1	3,5	2,6	4,5	5,9
Miage	31,8	34,7	40,4	41,2	40,4
Pre de Bar	6,1	7,7	6,1	6,1	5,7
Rochefort	2,2	2,6	5,6	19,6	
Triolet	7,7	9,3	12,3	12,1	12,5
Lavacciu	12,2	10,2	12,3	13,7	10,9
Tribolazione	2,9	2,2	3,0	1,7	1,8

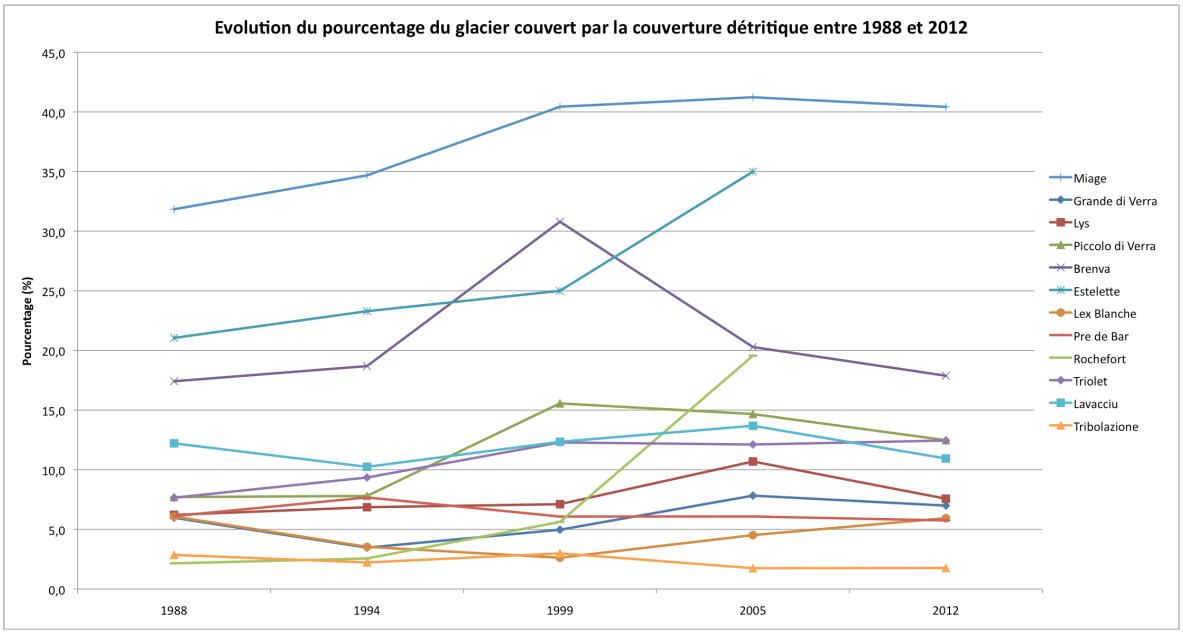


Figure 18 Evolution du pourcentage de couverture détritique des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012

1.3 Evolution de l'altitude maximale de la couverture détritique

Une autre manière d'évaluer le développement de la couverture détritique est de comparer l'altitude maximale qu'atteignent les débris pour chaque année de l'étude.
En effet, lorsque la langue glaciaire se retire, le pourcentage de couverture détritique peut diminuer parce que la langue est souvent couverte de débris. Comparer l'altitude maximale permet de connaître l'emprise des débris sur le glacier, car il peut y avoir un phénomène d'allongement de la bande de débris.

Tableau 8 Evolution de l'altitude maximale de couverture détritique entre 1988 et 2012

	1988	1994	1999	2005	2012
Grande di Verra	3326	3053	3473	3348	3311
Lys	3217	3080	3762	3484	3398
Piccolo di Verra	3230	3360	3495	3503	3747
Valtournanche	3183	3177	3331	3398	3213
Brenva	2721	2713	3424	2958	3033
Estelette	2592	2626	2735	2818	
Lex Blanche	2961	2766	2904	2895	2955
Miage	2954	2674	3011	3142	3153
Pre de Bar	2745	2756	2844	2859	2959
Rochefort	2711	2771	3285	3012	
Triolet	3045	3068	2895	2874	2938
Lavacciu	3293	3189	3437	3472	3400
Tribolazione	3504	3357	3293	3018	2974

Le tableau 8 donne les altitudes maximales en mètres de la couverture détritique des glaciers de la sélection. Cette information a été obtenue grâce à un MNT de 2008 couvrant la Vallée d'Aoste.

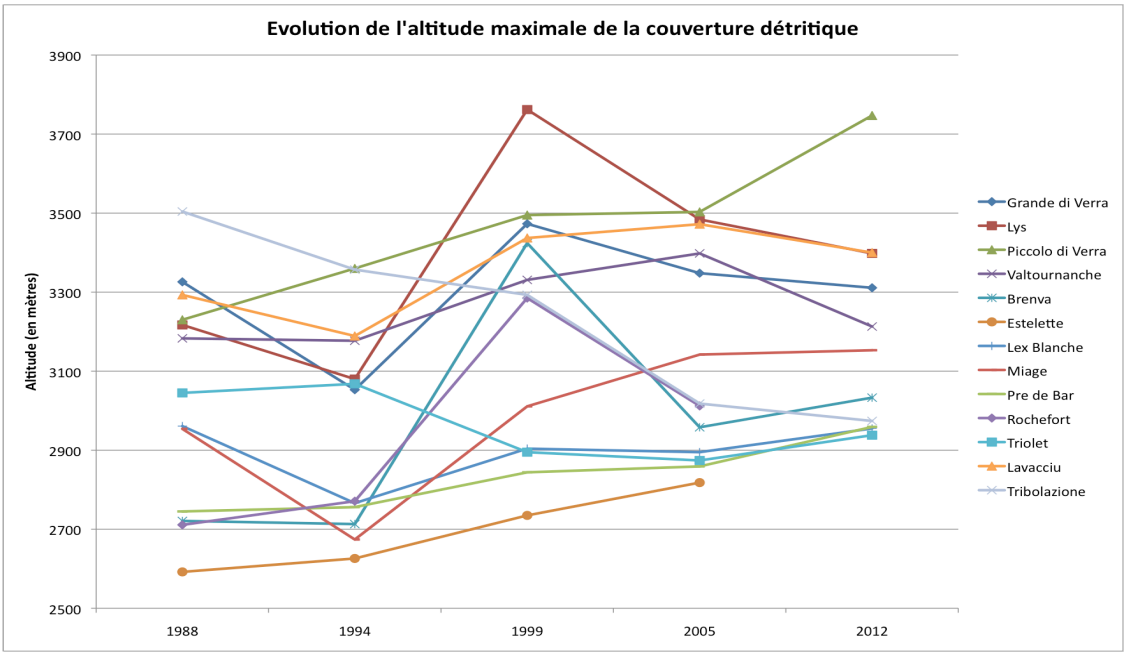
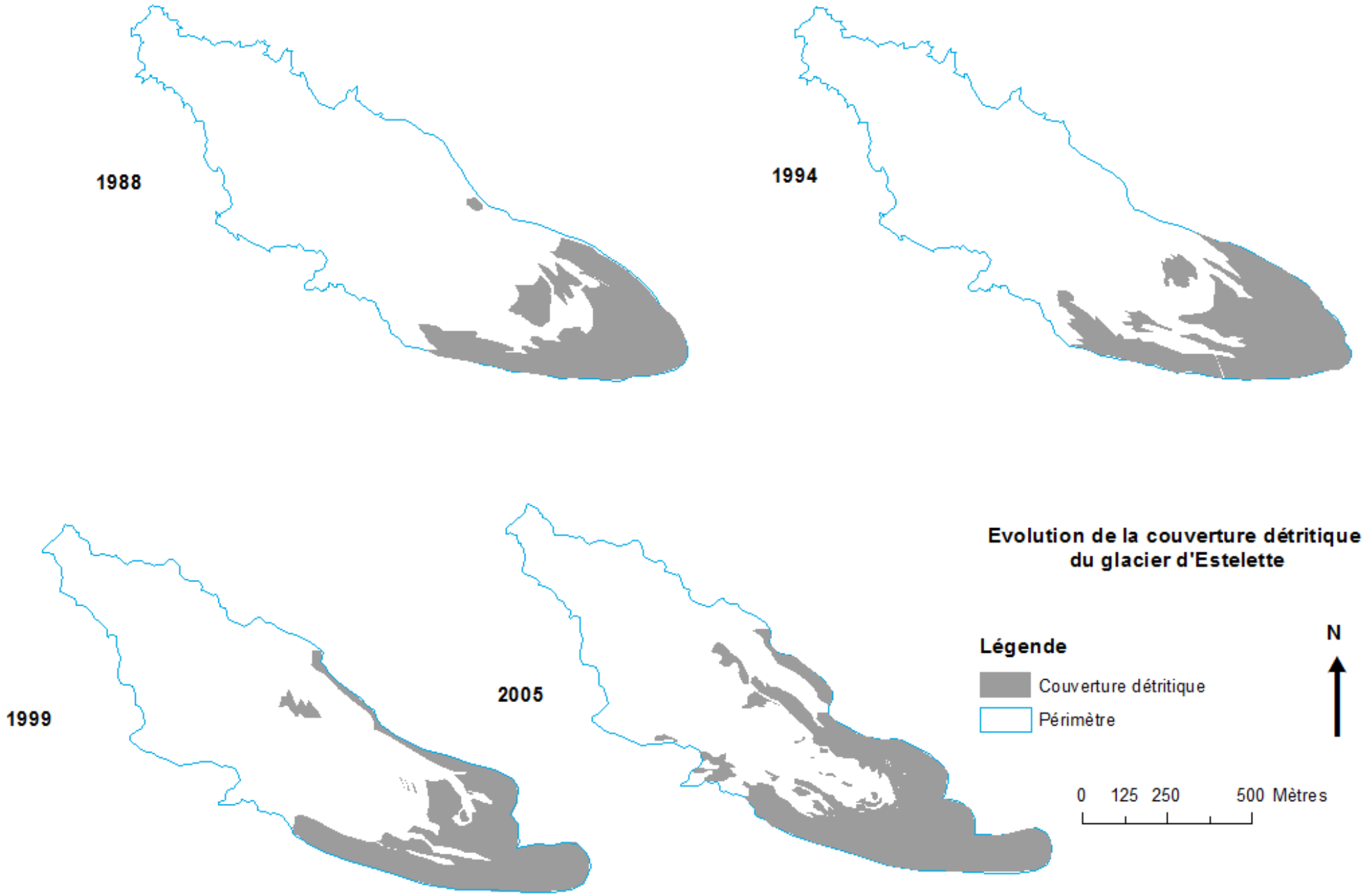


Figure 19 Evolution de l'altitude maximale de la couverture détritique pour les 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012

Le graphique des altitudes maximales, figure 19, montre qu'il n'y a pas de tendance générale qui ressort clairement. On peut toutefois remarquer une augmentation de l'altitude maximale de la couverture détritique pour certains glaciers : Estelette, Pre de Bar, Lex Blanche, Miage, Piccolo di Verra … Alors que d'autres glaciers ne connaissent pas d'augmentation linéaire de l'altitude maximale de la couverture détritique. Certaines valeurs s'expliquent par des dépôts d'écroulement qui sont la conséquence de bande de débris à une altitude plus élevée que l'altitude habituelle des débris du glacier. C'est le cas de Brenva en 1999.



igure 20 Evolution de la couverture détritique du glacier d'Estelette entre 1988 et 2005

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994
Réalisation : C. Meyer

2. Evolution par glacier

2.1 Secteur Monte Bianco

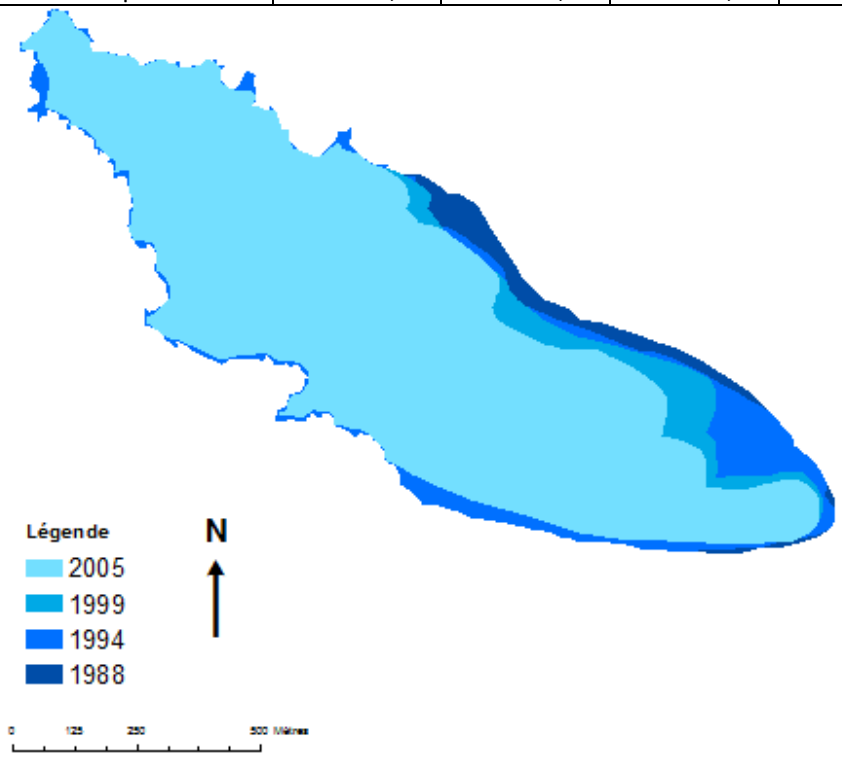
2.1.1 Estelette

Pour le glacier d'Estelette les images de 2012 n'ont pas pu être exploitées car de la neige masquait la majeure partie de la langue couverte de débris et il n'aurait donc pas été possible d'obtenir des résultats cohérents sur l'étude de cette année.

Estelette est le plus petit des glaciers de notre étude, c'est aussi l'un de ceux dont la couverture détritique a le plus fortement augmenté entre 1999 et 2005 (tableau 9). Les débris sont localisés au niveau du front et sur les côtés du glacier (figure 20). L'augmentation de la couverture détritique entre 1988 et 2005 s'exprime par une densification des débris au niveau du front, mais surtout une remontée des bandes couvrant les côtés du glacier à partir de 1999. En 2005 l'apparition d'une moraine médiane augmente de nouveau la superficie de la couverture détritique.
La superficie du glacier n'a fait que décroitre de 1988 à 2005, passant de 0,72 km² à 0,59 km². Cette diminution de superficie est due à un retrait de la langue plus marqué sur le côté gauche que sur le côté droit du glacier (figure 23).

Tableau 9 Données de superficie et de couverture détritique pour le glacier d'Estelette

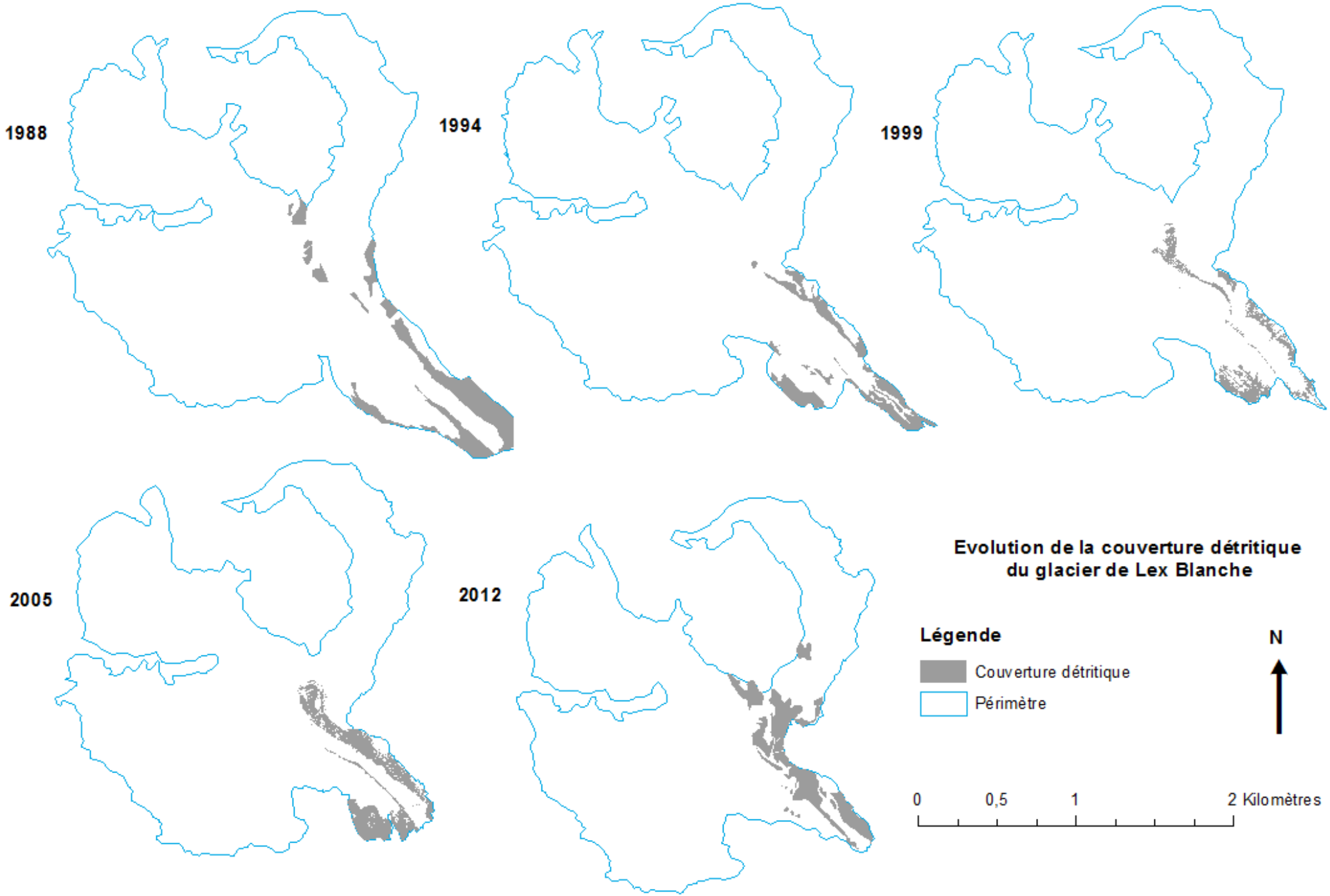
	1988	1994	1999	2005
Superficie (en km²)	0,72	0,69	0,63	0,59
Superficie couverture détritique (en km²)	0,15	0,16	0,16	0,21
Pourcentage couverture détritique	21,1%	23,3%	25,0%	35,0%



gure 23 Evolution de la superficie ı glacier d'Estelette

Evolution de la superficie du glacier d'Estelette

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994
Réalisation : C. Meyer



gure 24 Evolution de la couverture détritique du glacier de Triolet entre 1988 et 2012

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

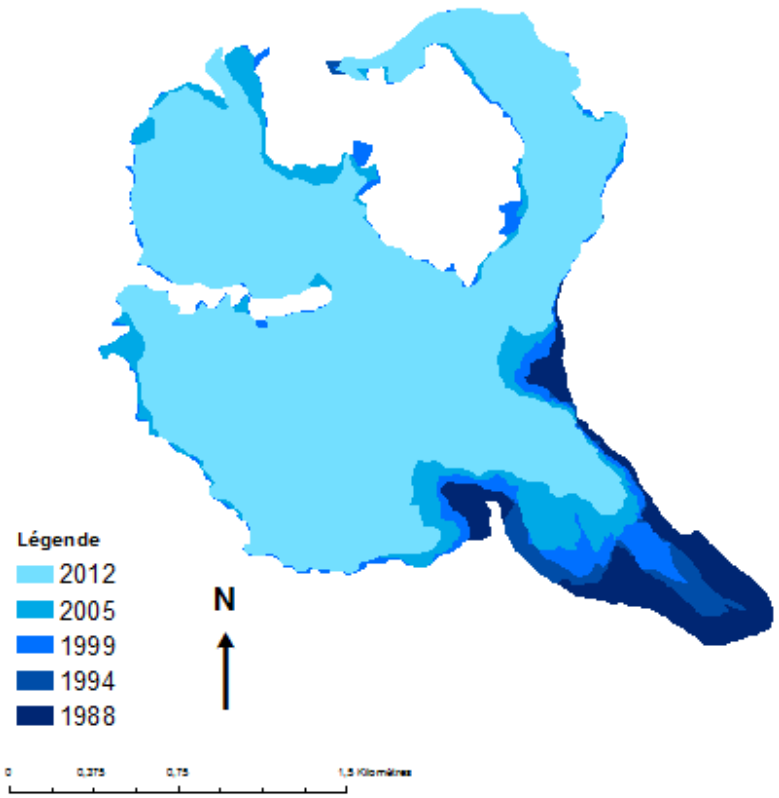
2.1.2 Lex Blanche

La superficie du glacier de Lex Blanche a diminué de près d'un 1km entre 1988 et 2012 (tableau 10), passant de 3,92 km² en 1988 à 3,06 km² en 2012. La diminution est forte au niveau de la langue, avec deux phases remarquables : entre 1988 et 1994 un fort rétrécissement de la langue qui se poursuit en 1999, puis entre 1999 et 2005 la bande de langue qui restait a disparu du glacier (figure 25).

Le pourcentage de couverture détritique n'a pas suivi la même évolution linéaire que la superficie du glacier. En 1988 et 1999 la couverture détritique diminue, alors qu'elle augmente entre 1999 et 2012. La diminution s'effectue au niveau du front qui se retire également entre 1988 et 1999.
D'une manière générale la couverture détritique est localisée sur les côtés de la langue, mais aussi en une moraine médiane au milieu de la langue glaciaire. Entre 1994 et 2012 la couverture détritique a tendance à remonter sur le glacier, atteignant en 2012 la paroi rocheuse séparant la zone d'accumulation gauche et celle du milieu (figure 24).

Tableau 10 Données de superficie et de couverture détritique pour le glacier de Triolet

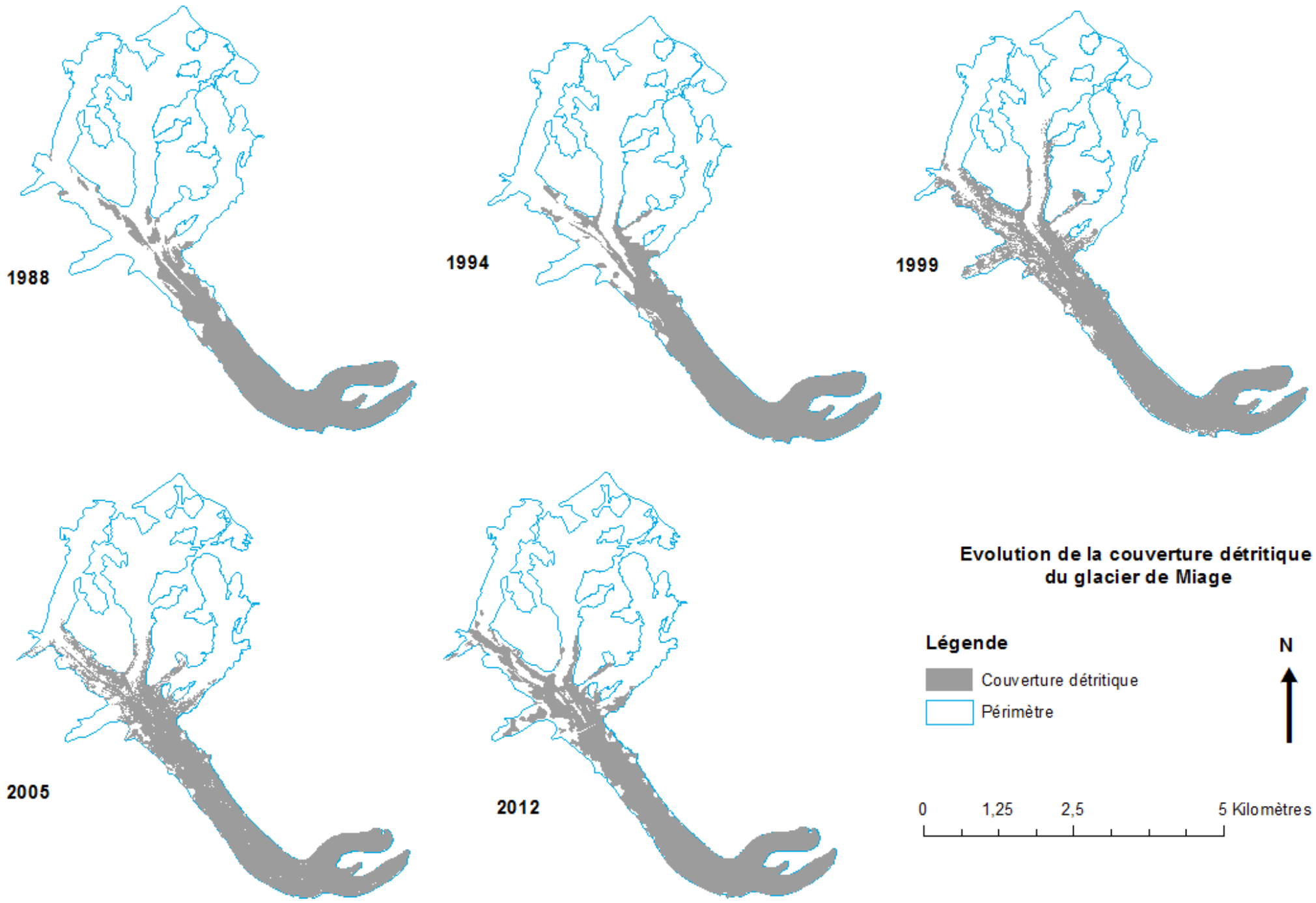
	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	3,92	3,63	3,53	3,39	3,06
Superficie couverture détritique (en km²)	0,21	0,13	0,09	0,15	0,18
Pourcentage couverture détritique	6,1%	3,5%	2,6%	4,5%	5,9%



Evolution de la superficie du glacier de Triolet

Figure 25 Evolution de la superficie

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012



gure 26 Evolution de la couverture détritique du glacier du Miage entre 1988 et 2012

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

2.1.3. Miage

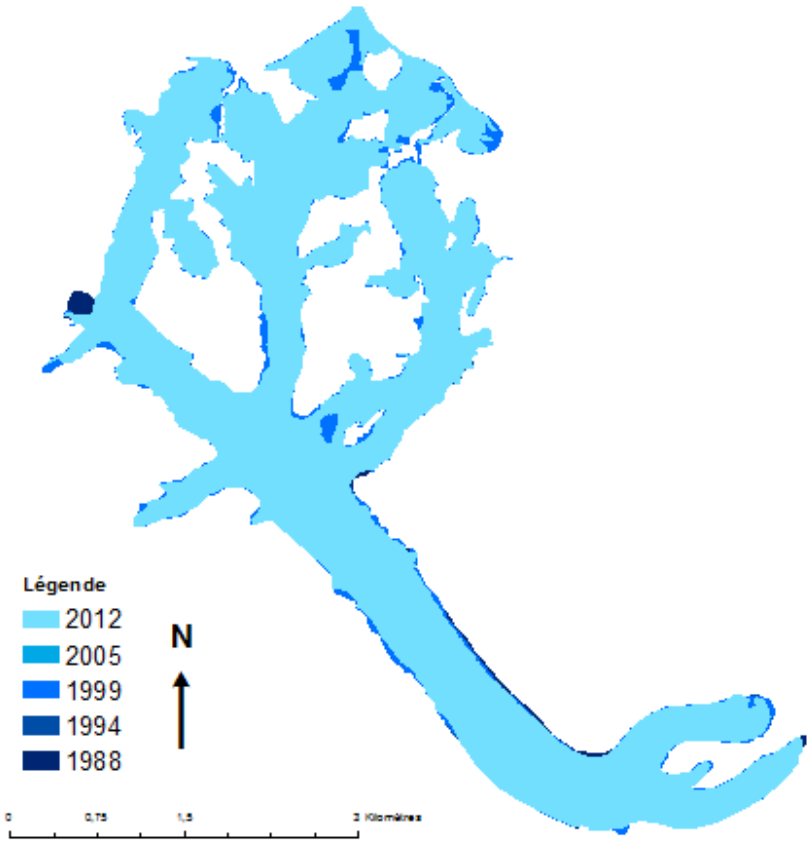
Le Miage est le plus grand et le plus couvert des glaciers de la sélection, avec une superficie de 10,98 km² et 31,8 % de débris en 1988 (tableau 11).

La superficie du glacier a peu évolué entre 1988 et 2012, passant de 10,98 km² à 10,58 km². À l'échelle du glacier cette légère diminution n'est presque pas visible, on peut simplement observer un léger retrait des bords de la langue glaciaire (figure 27).

L'évolution de la couverture détritique est elle plus marquée, elle augmente à partir de 1988 avec un maximum en 2005 à 41,2 % puis une diminution à 40,4% en 2012. La couverture détritique a tendance à se densifier sur la moitié supérieure du glacier, notamment entre 1994 et 1999, mais aussi à remonter sur les bords des différents glaciers alimentant la langue principale. La couverture détritique a également tendance à remonter en altitude entre 1988 et 2012 (figure 26).

Tableau 11 Données de superficie et de couverture détritique du glacier du Miage

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	10,98	10,90	10,81	10,58	10,58
Superficie couverture détritique (en km²)	3,50	3,78	4,37	4,36	4,28
Pourcentage couverture détritique	31,8%	34,7%	40,4%	41,2%	40,4%

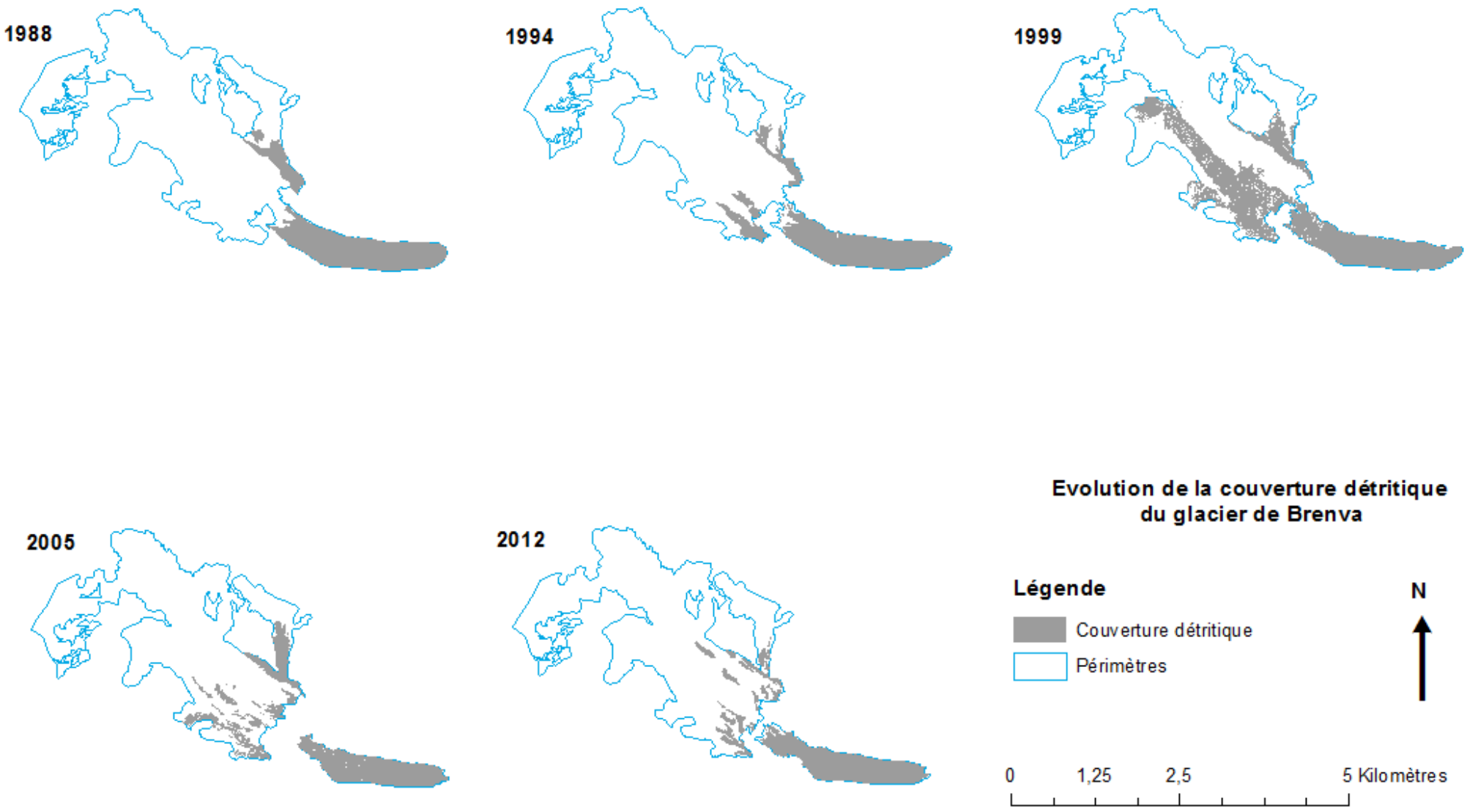


Evolution de la superficie du glacier de Miage

gure 27 Evolution de la surperficie

ı glacier du Miage

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012



gure 28 Evolution de la couverture détritique du glacier de Brenva entre 1988 et 2012

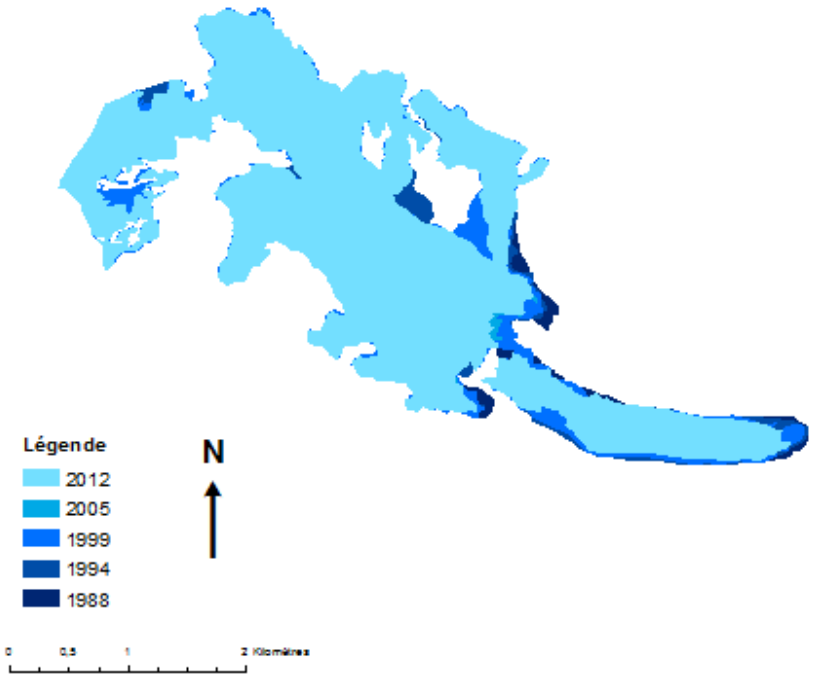
Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

2.1.4 Brenva

La superficie du glacier de Brenva diminue de manière continue entre 1988 et 2005, passant de 7,43 km² à 6,59 km², puis augmente légèrement entre 2005 et 2012 avec 6,77 km² en 2012 (tableau 12).
La diminution de la superficie est le résultat du détachement de la langue et du glacier principal que l'on observe en 2005. Ce détachement était déjà annoncé en 1994 et 1999 avec une forte diminution de la surface reliant la langue et son bassin d'alimentation (figure 29).
La couverture détritique n'a cessé de varier au cours des 5 années de l'étude. Si l'augmentation entre 1988 et 1994 est légère, elle est beaucoup plus marquée entre 1994 et 1999 passant de 18,7% à 30,8%. Avant 1999 la couverture est surtout présente sur l'intégralité de la langue et sur les côtés de la zone supérieure. En 1999 la couverture détritique remonte sur pratiquement tout le glacier et forme une bande large sur la moitié droite du glacier. En 2005 et 2012, la couverture détritique a beaucoup diminuée par rapport à 1999 et sa valeur en 2012 est proche de sa valeur au début de l'étude : 17,9%.

Tableau 12 Données de superficie et de couverture détritique du glacier de Brenva

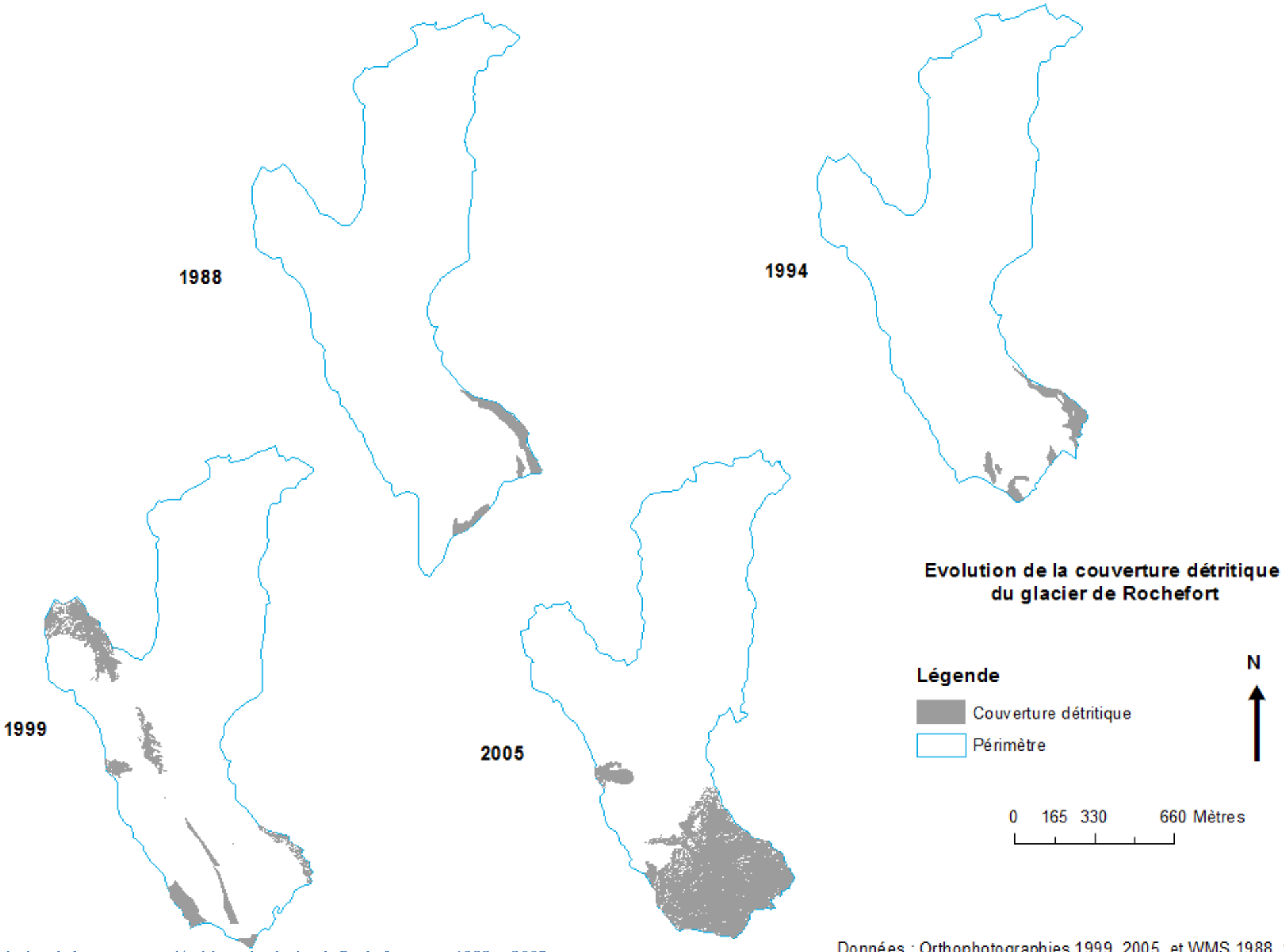
	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	7,43	7,29	7,07	6,59	6,77
Superficie couverture détritique (en km²)	1,29	1,36	2,18	1,34	1,21
Pourcentage couverture détritique	17,4%	18,7%	30,8%	20,3%	17,9%



Evolution de la superficie du glacier de Brenva

gure 29 Evolution de la superficie

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012



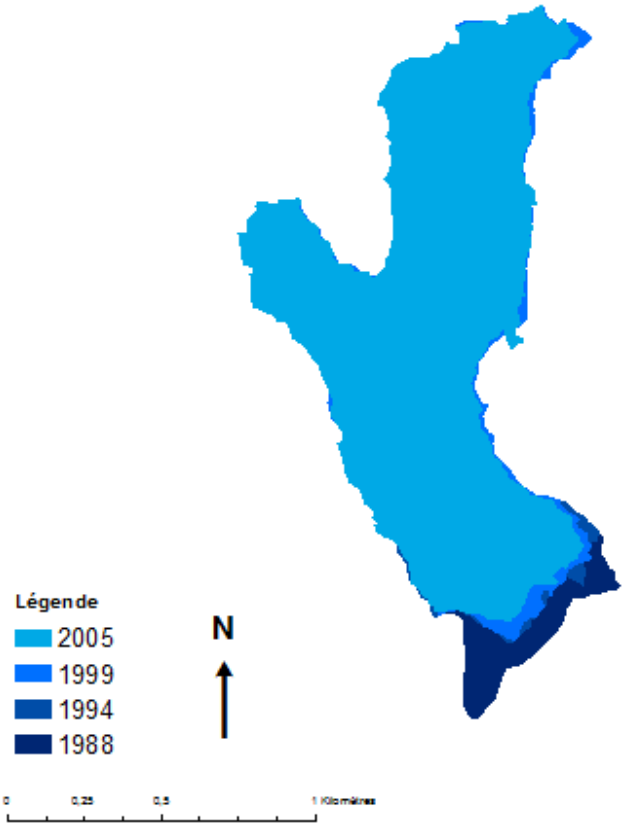
gure 30 Evolution de la couverture détritique du glacier de Rochefort entre 1988 et 2005

2.1.5 Rochefort

Comme pour le glacier d'Estelette, les images de 2012 n'ont pas pu être exploitées pour le glacier de Rochefort car la majeure partie de la couverture détritique de 2005 était couverte de neige sur les images de 2012.

En terme de superficie le glacier a diminué entre 1988 et 2005, passant de 1,17 km^2 en 1988 à 1,08 km^2 en 2012 (tableau 13). Si la différence dans les chiffres n'est pas très importante, elle se remarque par un retrait progressif du front, particulièrement marqué entre 1988 et 1994 (figure 31).
L'évolution de la couverture détritique est plus marquée, avec une accélération à partir de 1999 et une très forte augmentation en 2012. La couverture détritique se développe d'abord sur le côté gauche et sur le front du glacier en 1988 et 1994, puis on observe la création d'une moraine médiane en 1999, ainsi qu'une tendance à l'élévation en altitude de la couverture détritique. En 2005 la couverture couvre toute la moitié inférieure du glacier (figure 30).

	1988	1994	1999	2005
Superficie (en km²)	1,17	1,10	1,08	1,08
Superficie couverture détritique (en km²)	0,03	0,03	0,06	0,21
Par de couverture détritique par rapport à la surface totale du glacier	2,2%	2,6%	5,6%	19,6%

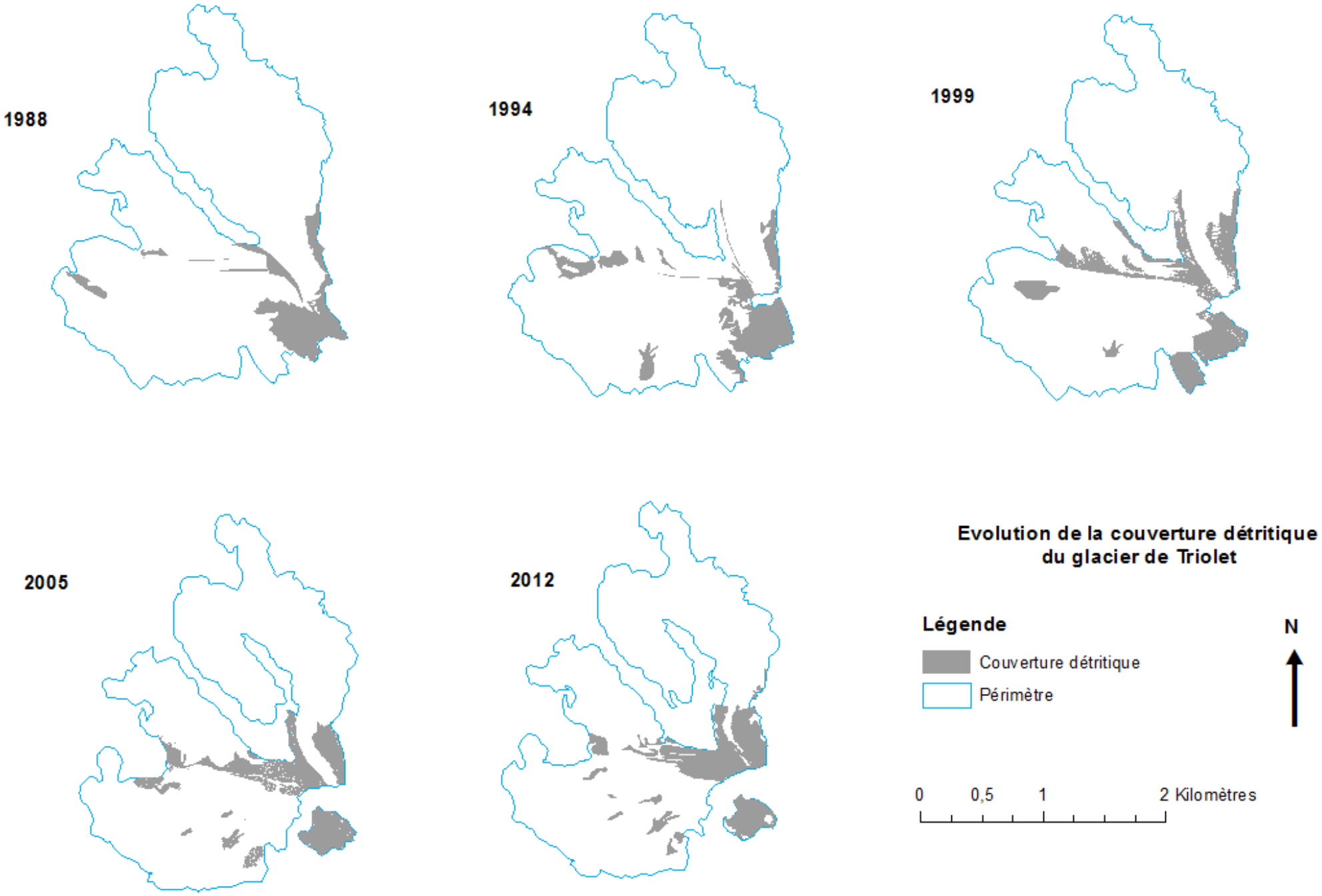


Evolution de la superficie du glacier de Rochefort

gure 31Evolution de la superficie

ı glacier de Rochefort

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994
Réalisation : C. Meyer



gure 32 Evolution de la couverture détritique du glacier de Triolet entre 1988 et 2012

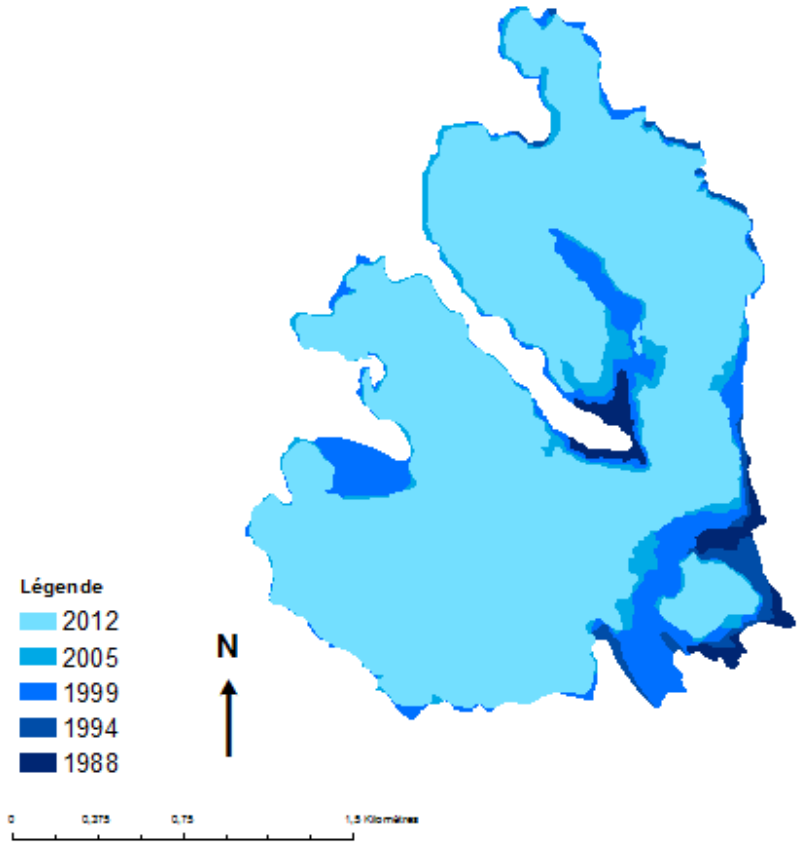
Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

2.1.6 Triolet

La superficie du glacier de Triolet a diminué tout au long de l'étude, passant de 4,36 km² en 1988 à 3,56 km² en 2012. Cette forte diminution s'est exprimée par un détachement de la langue glaciaire et du glacier principal en 2005. Comme pour d'autres glaciers dans le même cas, ce détachement a d'abord été annoncé par l'ouverture d'une encoche entre la langue et le bassin d'accumulation en 1994. On peut également remarquer que le détachement de la langue a provoqué la disparition d'une petite langue à gauche de la principale.
Le pourcentage de couverture détritique a globalement augmenté, passant de 7,7% en 1988 à 12,5%. On peut tout de même noter une légère diminution en 2005 par rapport à 1999. La couverture détritique est localisée principalement sur le front du glacier, le côté gauche et en deux moraines médianes qui tendent à s'épaissir à partir de 1999. On observe également une tendance à l'élévation de la couverture détritique liée à cette densification. Sur le côté droit du glacier des dépôts d'écroulement sont visible et l'on peut les suivre d'une année à l'autre à partir de 1994.

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	4,36	4,27	4,17	3,75	3,56
Superficie couverture détritique (en km²)	0,33	0,40	0,51	0,45	0,44
Par de couverture détritique par rapport à la surface totale du glacier	7,7%	9,3%	12,3%	12,1%	12,5%

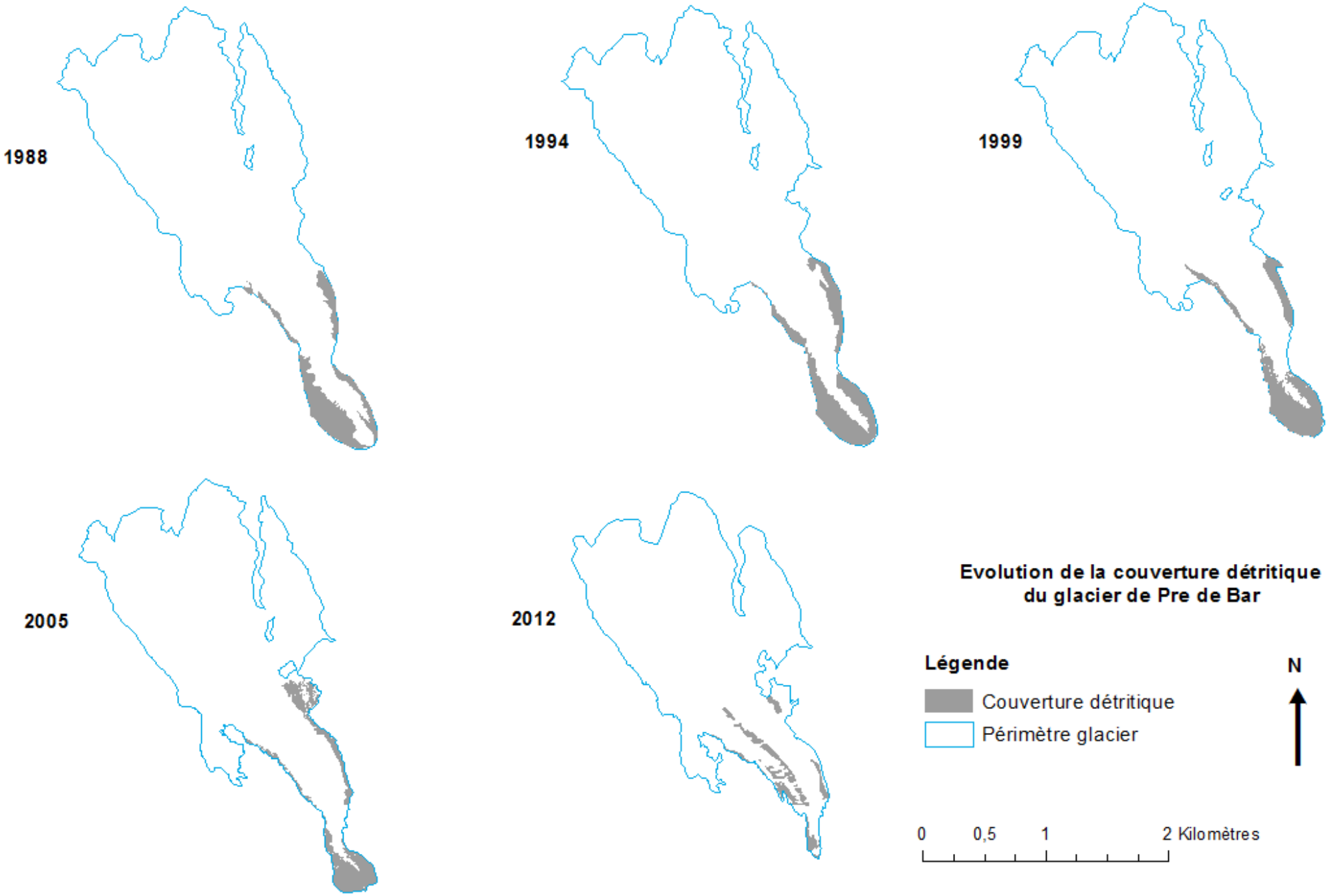
Tableau 13 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Triolet



Evolution de la superficie du glacier de Triolet

gure 33 Evolution de la superficie

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012



gure 34 Evolution de la couverture détritique du glacier de Pre de Bar entre 1988 et 2012

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

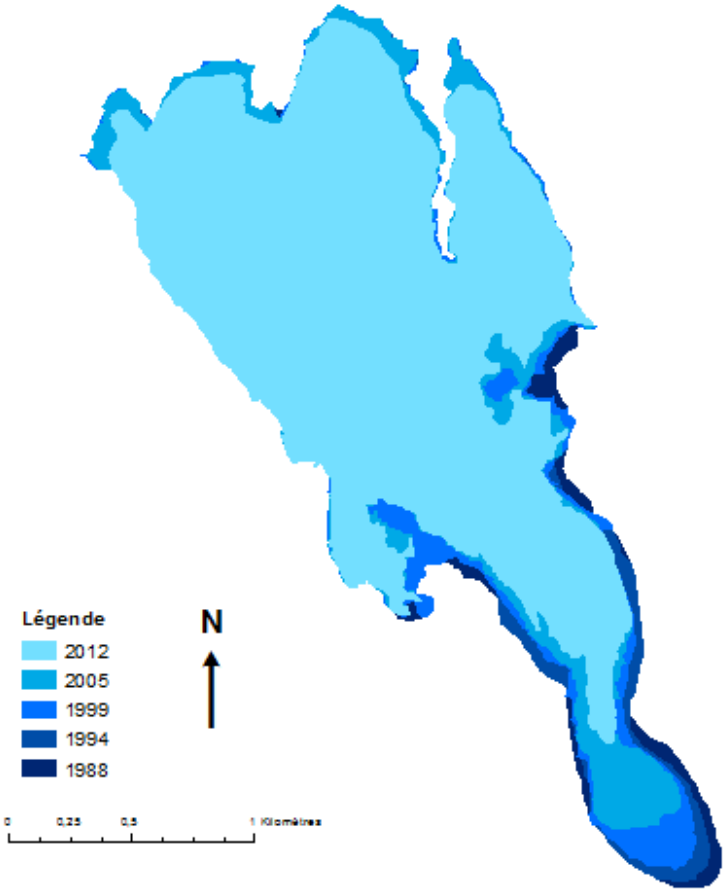
2.1.7 Pre de Bar

Le glacier de Pre de Bar est l'un des glaciers de la sélection pour lequel la superficie a fortement diminuée entre 1988 et 2012. En effet elle était de 3,48 km^2 en 1988 et n'est plus que de 1,74 km^2 soit une diminution de moitié en 25 ans (tableau 14). Cette perte de superficie est caractérisée par un retrait de la langue qui se produit dès le début de l'étude mais qui s'accélère à partir de 2005 et surtout en 2012 où il n'existe plus qu'une petite bande rappelant l'emplacement de l'ancienne langue glaciaire (figure 35).

La couverture détritique n'a pas suivi cette évolution linéaire et l'on observe une augmentation entre 1988 et 1994 puis de nouveau une diminution entre 1994 et 2012. Entre 1988 et 2005 les débris sont localisés sur le front et les côtés de la langue, alors qu'en 2012 ils sont plutôt groupés en une moraine médiane que sur les côtés du glacier (figure 34).

Tableau 14 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Pre de Bar

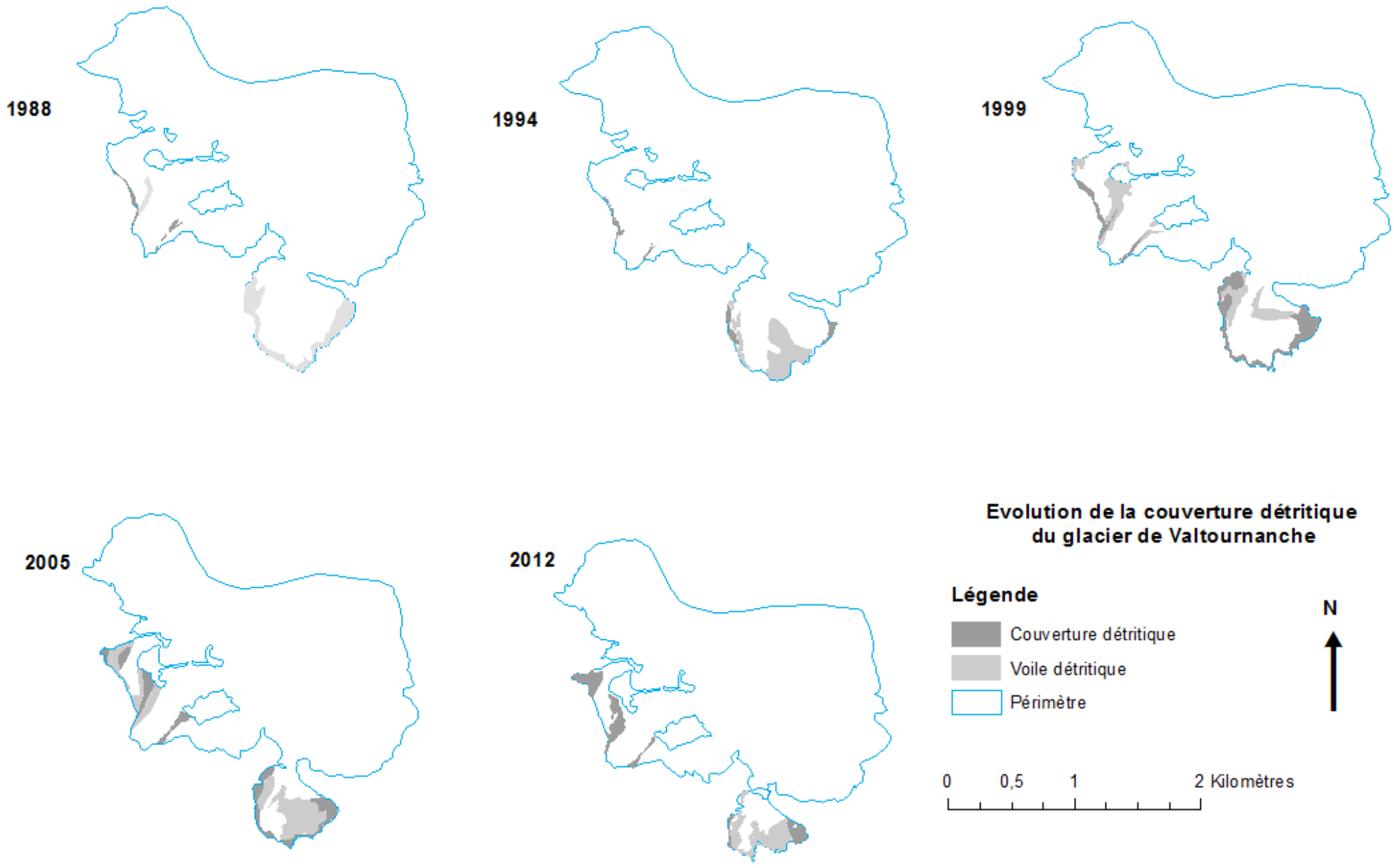
	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	3,48	3,40	3,30	3,09	1,74
Superficie couverture détritique (en km²)	0,21	0,26	0,20	0,19	1,00
Pourcentage couverture détritique	6,1	7,7	6,1	6,1	5,7



Evolution de la superficie du glacier de Pre de Bar

gure 35 Evolution de la superficie

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012



gure 36 Evolution de la couverture détritique du glacier de Valtournanche entre 1988 et 2012

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

2.2. Secteur Lys

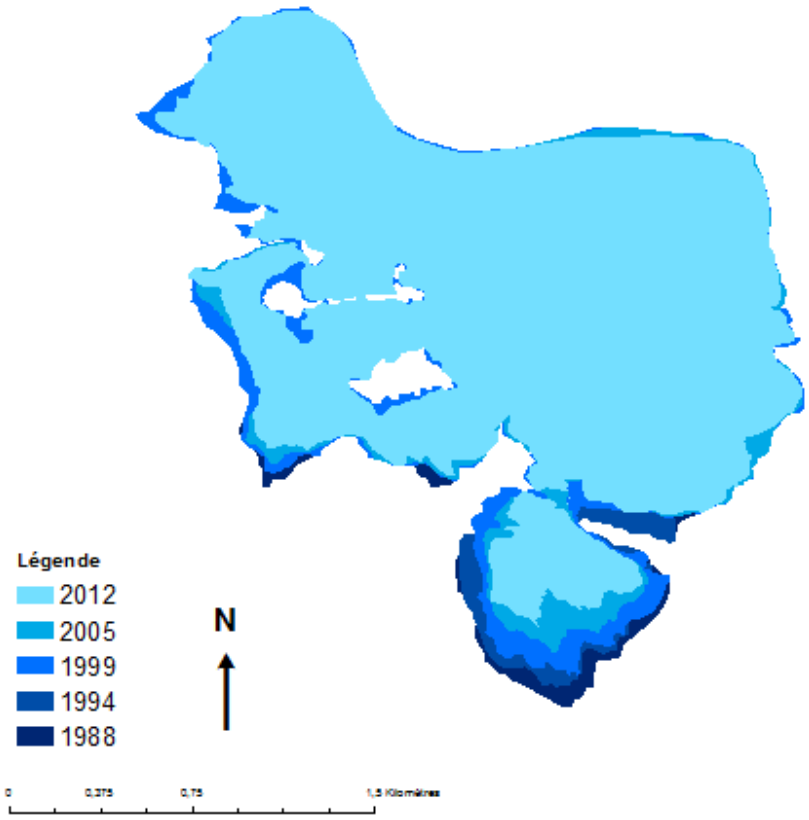
2.2.1 Valtournanche

La superficie du glacier de Valtournanche a diminué entre 1988 et 2012, passant de 3,98 km² à 3,4 km² (tableau 15). Si cette diminution est moins marquée que pour d'autres glaciers de la sélection, il est néanmoins possible d'observer le retrait régulier de la langue gauche du glacier, plus affecté que la partie droite (figure 37).

Valtournanche est le seul glacier pour lequel le voile détritique a été pris en compte. L'évolution du voile détritique n'est pas linéaire a augmenté et diminué plusieurs fois au cours de l'étude. De plus la localisation du voile n'est pas toujours la même, même si c'est principalement la langue gauche qui est recouverte de voile détritique. La couverture détritique a elle connu une évolution plus linéaire, avec une augmentation jusqu'en 1999-2005 puis une légère diminution en 2012. Elle tend à augmenter plutôt sur le côté droit du glacier et sur les marges de la langue gauche (figure 36).

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie	3,98	3,91	3,82	3,58	3,42
Superficie couverture détritique	0,02	0,03	0,12	0,11	0,10
Superficie voile détritique	0,4	0,8	3,2	3,1	2,6
Pourcentage couverture détritique	0,4	0,8	3,2	3,1	2,6
Pourcentage voile détritique	3,0	2,9	3,5	5,0	2,4

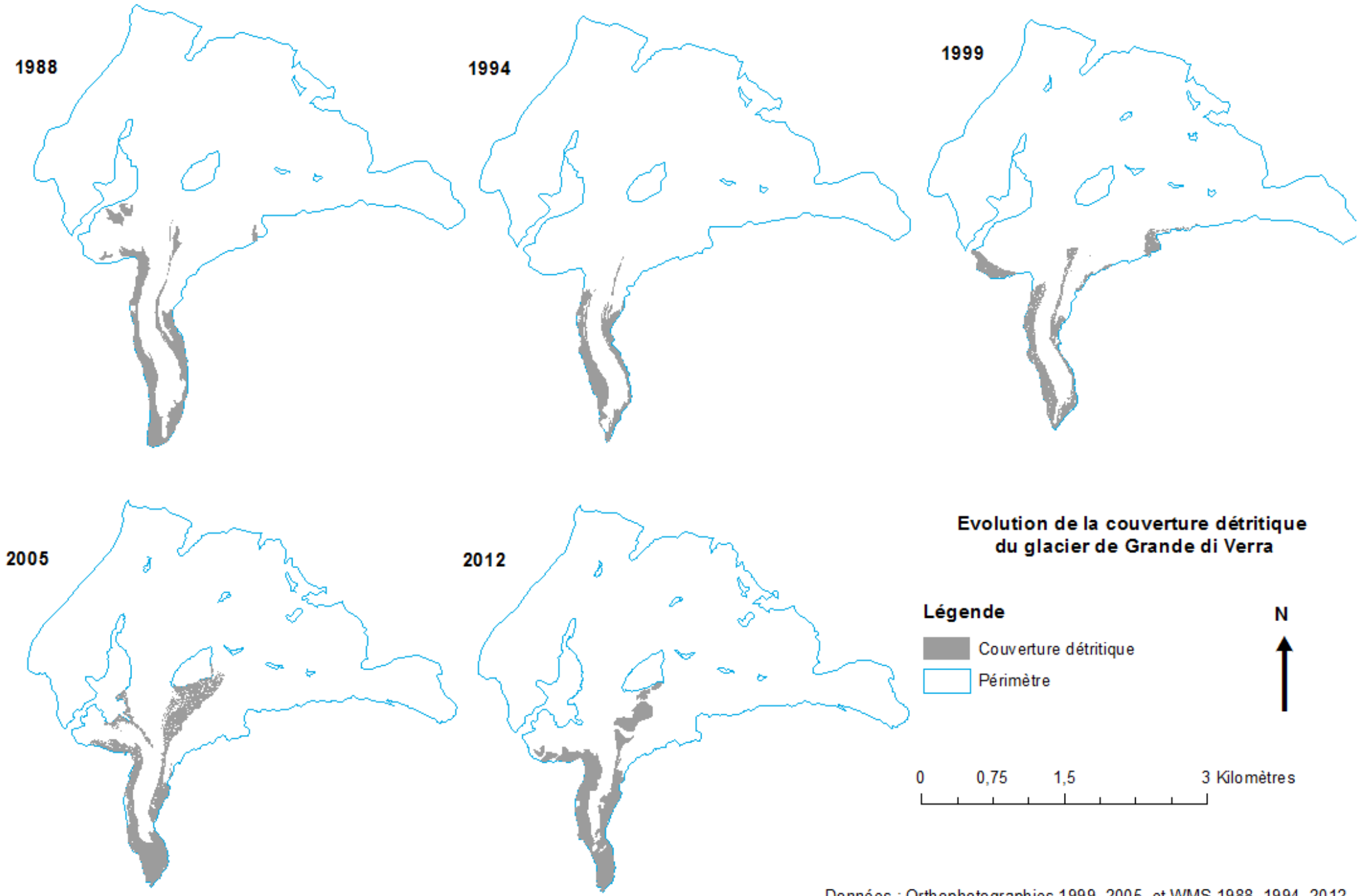
Tableau 15 Données de superficie, voile et couverture détritique du glacier de Valtournanche



Evolution de la superficie du glacier de Valtournanche

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012

Figure 37 Evolution de la superficie



gure 38 Evolution de la couverture détritique du glacier de Grande di Verra entre 1988 et 2012

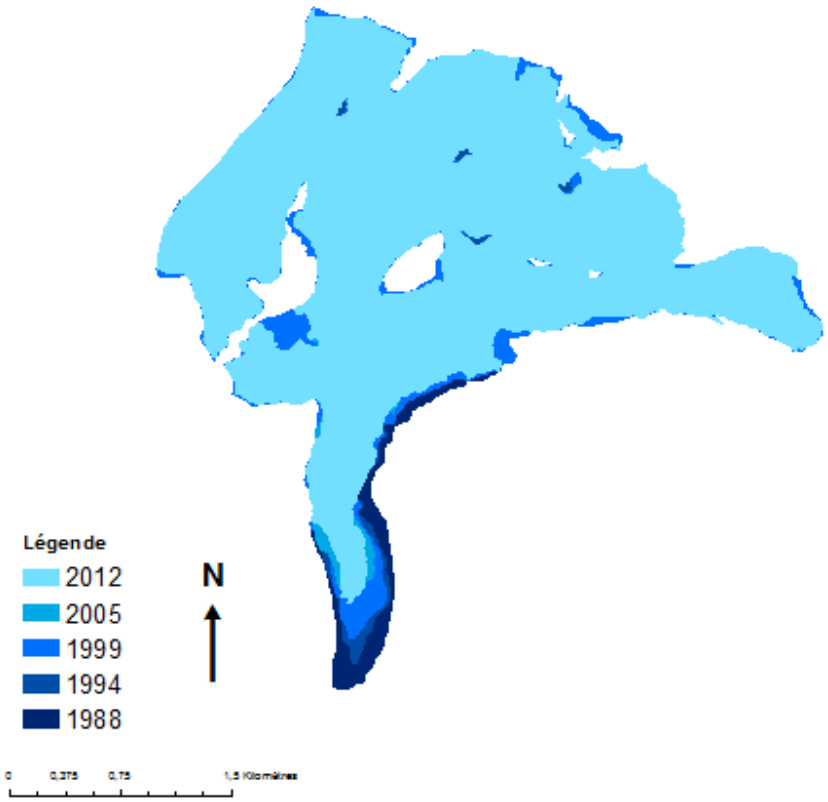
2.2.2 Grande di Verra

De manière similaire à de nombreux glaciers de l'étude, Grande di Verra a vu sa superficie diminuer entre 1988 et 2012 passant de 7,25 km² en 1988 à 6,64 km² en 2012 (tableau 16). La diminution s'observe par un retrait du front et un amincissement de la langue glaciaire (figure 39).

La couverture détritique a connu une évolution non linéaire, avec une diminution entre 1988 et 1994, puis une augmentation entre 1988 et 2005 et de nouveau une diminution entre 2005 et 2012. Les débris sont localisés sur les côtés de la langue, et l'on peut observer une tendance à l'élévation en altitude notamment à partir de 2005 (figure 38).

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	7,25	7,02	6,94	6,64	6,64
Superficie couverture détritique (en km²)	0,43	0,24	0,34	0,52	0,46
Pourcentage couverture détritique	6 %	3,5 %	5 %	7,8 %	7 %

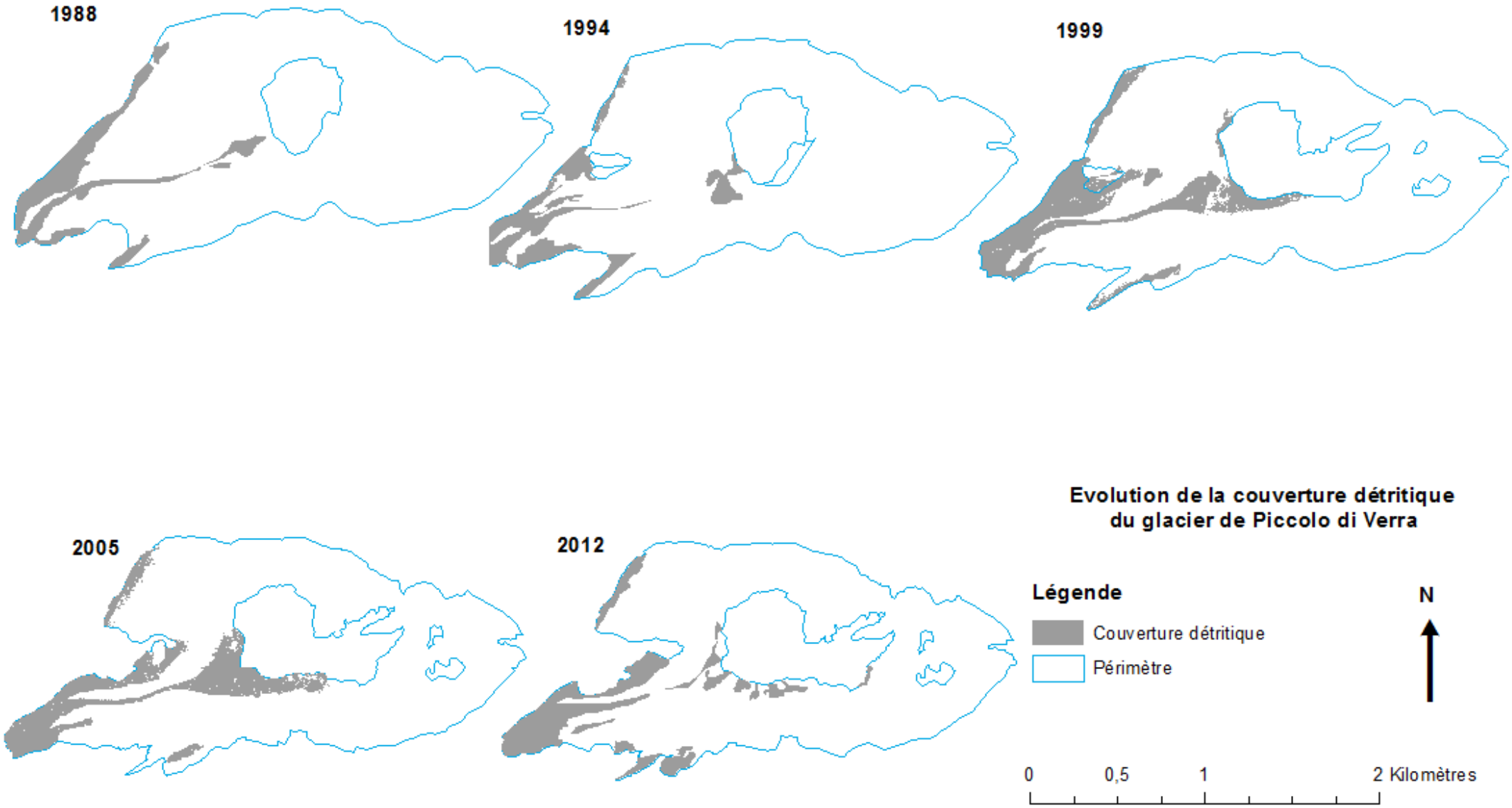
Tableau 16 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Grande di Verra



Evolution de la superficie du glacier de Grande di Verra

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994

gure 39 Evolution de la superficie



gure 40 Evolution de la couverture détritique du glacier de Piccolo di Verra entre 1988 et 2012

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

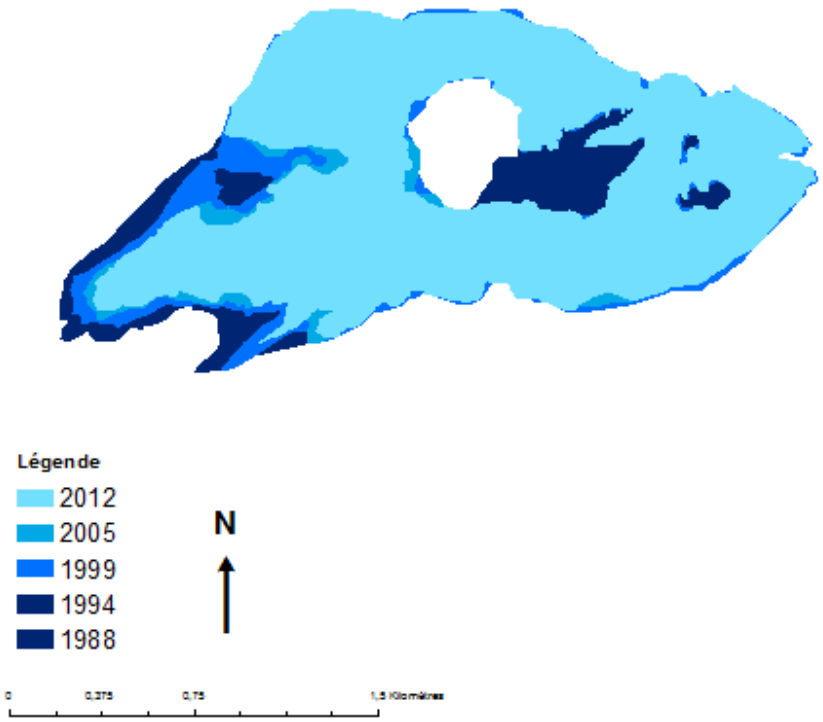
2.2.3 Piccolo di Verra

La superficie de Piccolo di Verra a peu diminué entre 1988 et 1994 passant de 2,62 km² à 2,52 km² (tableau 17). Cependant on peut observer une diminution plus importante à partir de 1999 qui se poursuit jusqu'en 2012. Cette diminution est le résultat d'une découpe sur le côté droit du glacier (figure 41).

Entre 1988 et 1994 la couverture détritique de Piccolo di Verra a peu évolué, alors qu'elle double entre 1994 et 1999, pour ensuite diminuer jusqu'en 2012.
Elle est principalement localisée sur le côté droit du glacier, sur le front et en une moraine médiane. La couverture détritique a tendance à se densifier au niveau du front, mais surtout au niveau de la moraine médiane qui atteint la paroi rocheuse de manière pratiquement continue en 1999 (figure 40).

Tableau 17 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Piccolo di Verra

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	2,62	2,52	2,29	2,13	2,05
Superficie couverture détritique (en km²)	0,20	0,20	0,36	0,31	0,26
Pourcentage couverture détritique	7,7	7,8	15,6	14,7	12,5

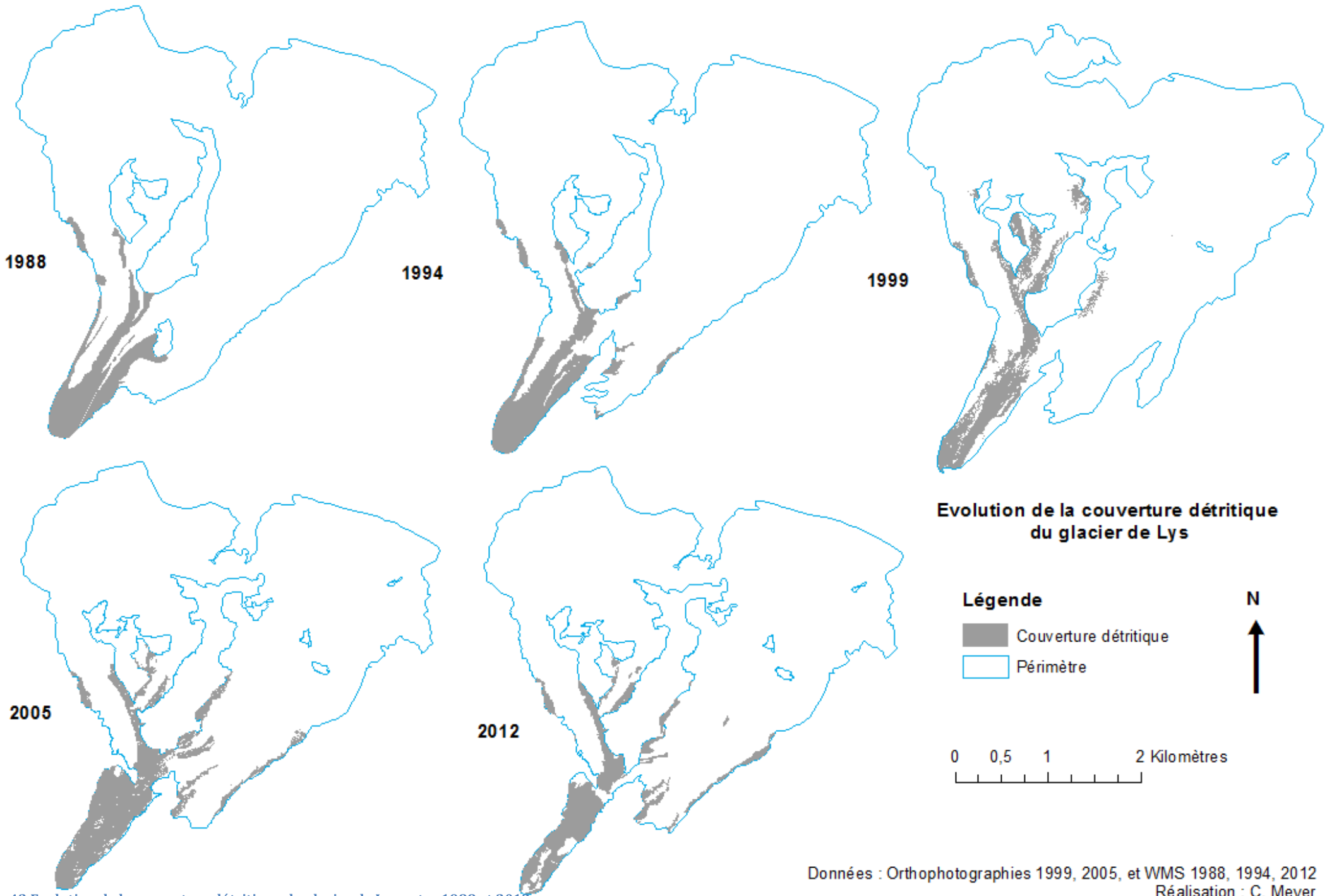


Evolution de la superficie du glacier de Piccolo di Verra

gure 41 Evolution de la superficie

glacier de Piccolo di Verra

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012



gure 42 Evolution de la couverture détritique du glacier de Lys entre 1988 et 2012

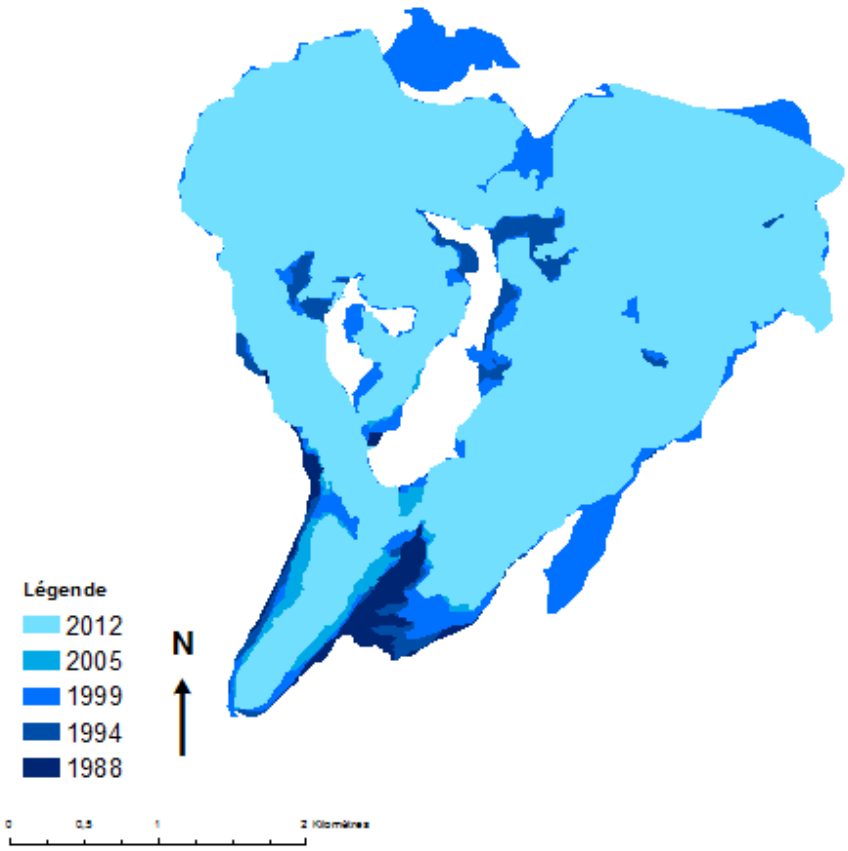
2.2.4 Lys

La superficie du glacier de Lys a diminué constamment tout au long de l'étude, passant de 10,75 km² en 1988 à 9,49 km² en 2012. La perte de superficie s'exprime par un retrait du front et un amincissement de la langue (figure 43).

La couverture détritique a augmenté entre 1988 et 2005, puis connu une diminution entre 2005 et 2012. Elle est principalement localisée sur la langue glaciaire, mais l'on observe une remontée des débris sur les côtés des glaciers alimentant la langue à partir de 1999 (figure 42).

Tableau 18 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Lys

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	10,75	10,41	10,75	9,57	9,49
Superficie couverture détritique (en km²)	0,67	0,71	0,76	1,02	0,72
Pourcentage couverture détritique	6,2	6,9	7,1	10,7	7,6

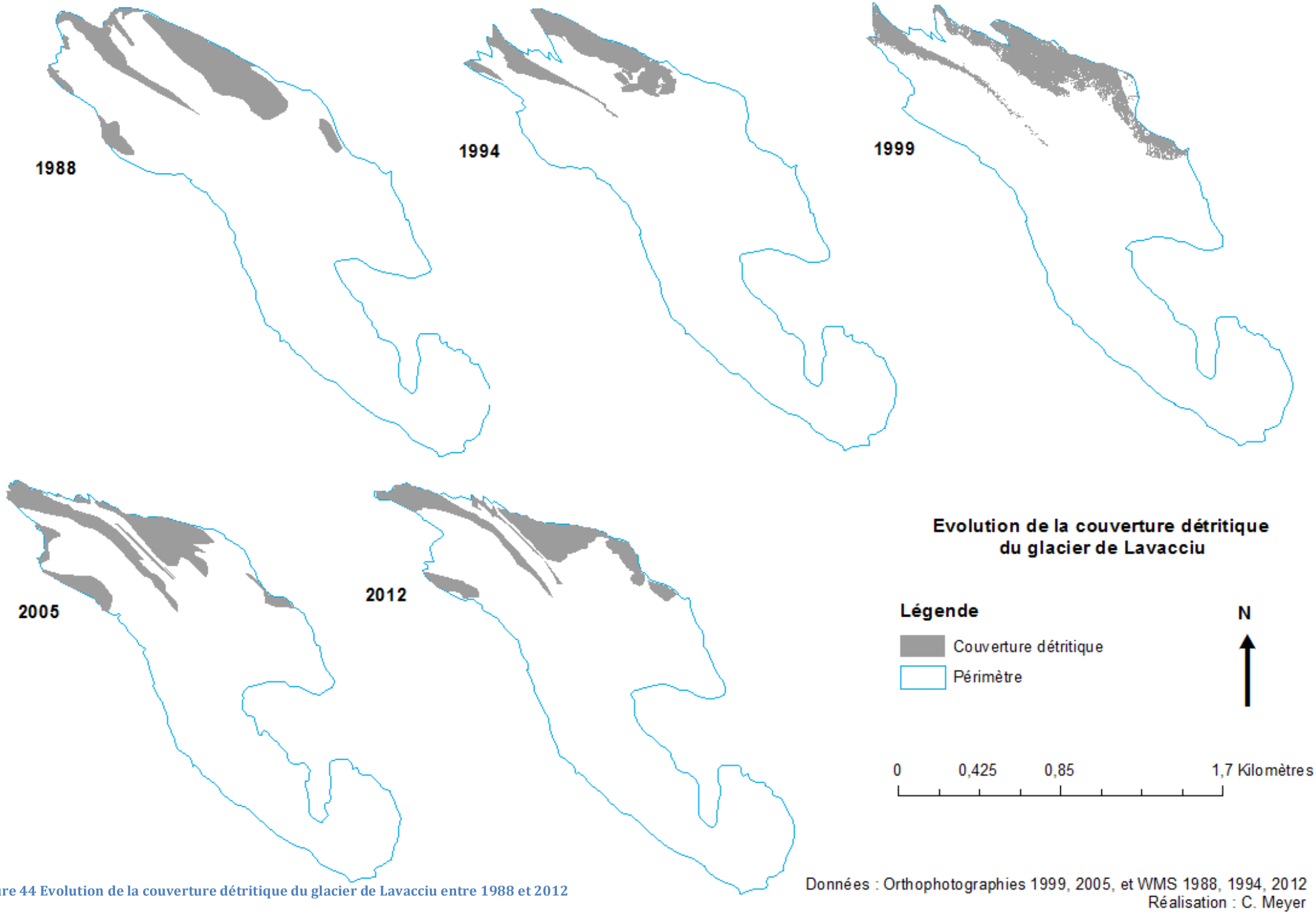


gure 43 Evolution de la

ıperficie du glacier de Lys

Evolution de la superficie du glacier de Lys

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer



gure 44 Evolution de la couverture détritique du glacier de Lavacciu entre 1988 et 2012

2.3 Secteur Valsavaranche-Cogne

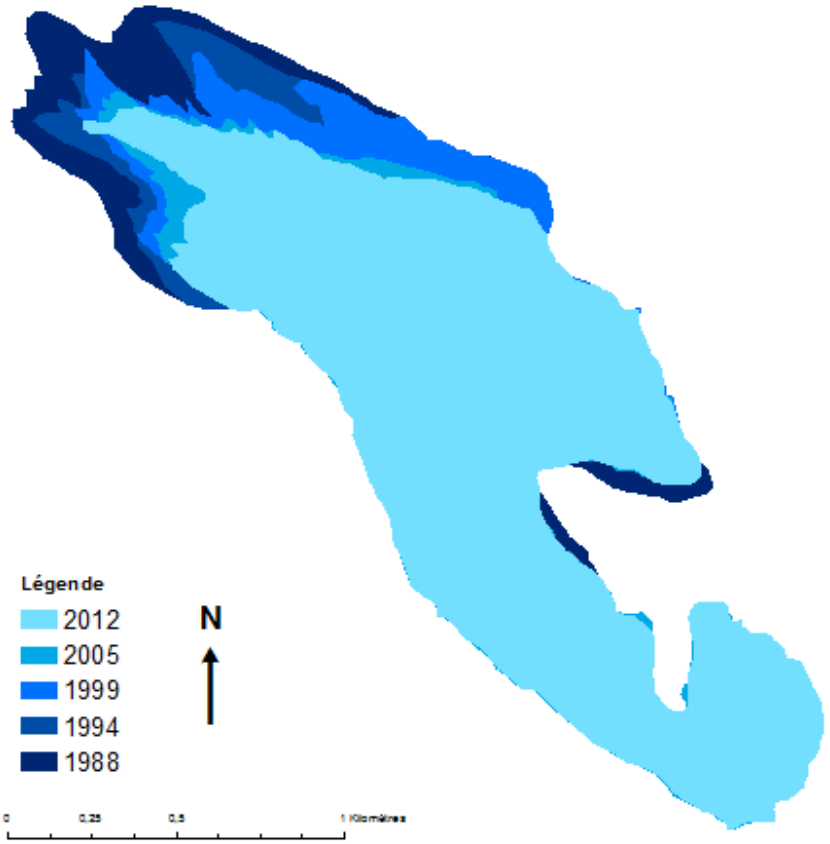
2.3.1 Lavacciu

La surface du glacier de Lavacciu est passée de 2,11 km² en 1988 à 1,61 km² en 2012 (tableau 19), avec un retrait de la langue plus marquée entre 1988 et 1994 et entre 1999 et 2005 (figure 45).

La couverture détritique n'a pas évolué linéairement entre 1988 et 2012, on observe une diminution entre 1988 et 1994, puis une augmentation entre 1994 et 2005, et de nouveau une diminution en 2005 et 2012. Les débris sont localisés principalement sur le côté droit du glacier, et en une moraine médiane. En 1999 la couverture détritique a tendance à s'élever en altitude, et à partir de 2005 on observe un agrandissement sur le côté gauche du glacier (figure 44).

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	2,11	1,92	1,82	1,62	1,61
Superficie couverture détritique (en km²)	0,26	0,20	0,22	0,22	0,18
Pourcentage couverture détritique	12,2	10,2	12,3	13,7	10,9

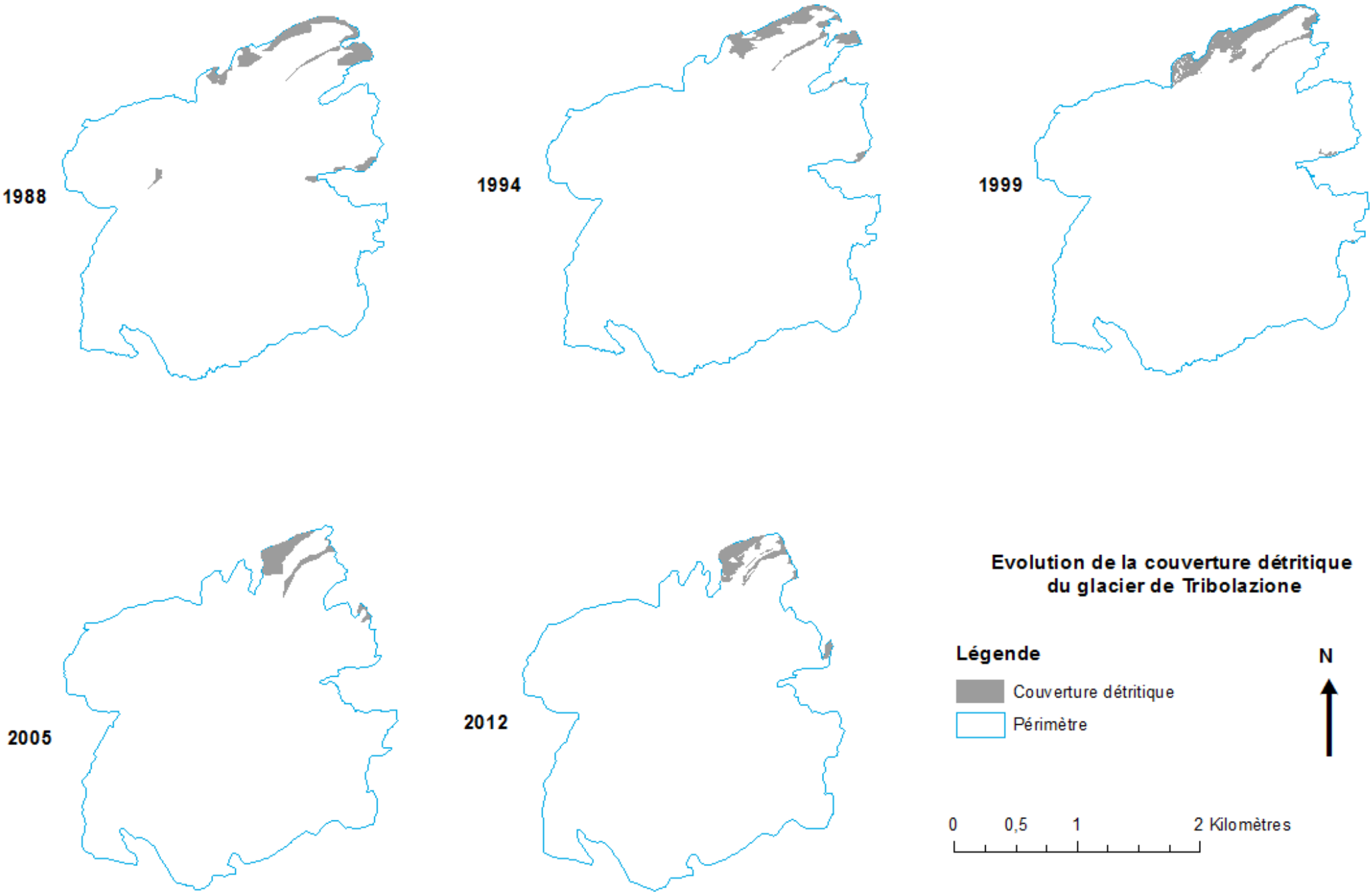
Tableau 19 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Lavacciu



Evolution de la superficie du glacier de Lavacciu

Figure 45 Evolution de la superficie

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer



gure 46 Evolution de la couverture détritique du glacier de Tribolazione entre 1988 et 2012

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

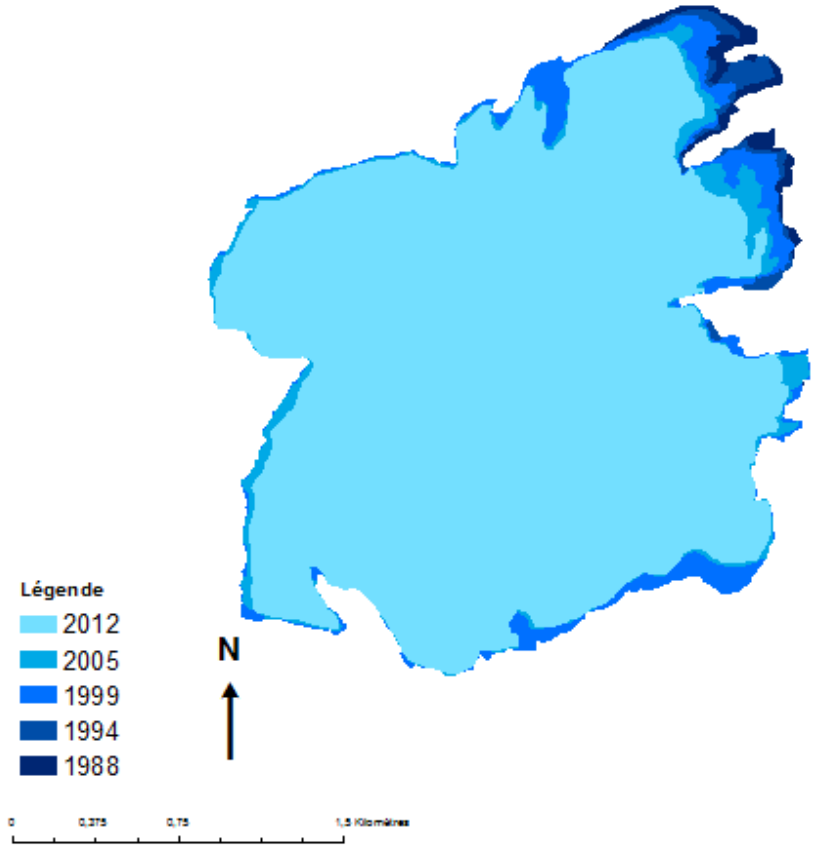
2.3.2 Tribolazione

La superficie du glacier de Tribolazione a diminué de 5,58 km² à 4,92 km² entre 1988 et 2012 (tableau 20). Si cette diminution n'est pas beaucoup marquée, on peut toutefois l'observer par un retrait progressif du front et la création d'une encoche sur le côté gauche du glacier (figure 47).

Le glacier de Tribolazione est de tous les glaciers de la sélection celui avec le pourcentage de couverture détritique le plus faible. Le maximum de couverture détritique est atteint en 1999 avec 3%. Les débris ont tendance à remonter en altitude entre 1988 et 1999 mais ça n'est plus le cas à partir de 2005 lorsque le glacier est affecté par une encoche sur le côté gauche (figure 46).

Tableau 20 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Tribolazione

	1988	1994	1999	2005	2012
Superficie (en km²)	5,58	5,50	5,42	5,10	4,92
Superficie couverture détritique (en km²)	0,16	0,12	0,16	0,09	0,09
Pourcentage couverture détritique	2,9%	2,2%	3,0%	1,7%	1,8%



Evolution de la superficie du glacier de Tribolazione

Données : Orthophotographies 1999, 2005, et WMS 1988, 1994, 2012
Réalisation : C. Meyer

Figure 47 Evolution de la superficie du glacier de Tribolazione

Chapitre 4 : Discussion

1. Classer les débris

1.1 Intérêt de la méthode de classification

L'étude de la couverture détritique des glaciers du Val d'Aoste devait concerner tous les glaciers de la Vallée d'Aoste, soit environ 200 glaciers, pour un intervalle de temps assez court allant de 1999 à 2012. Cependant un conflit entre la société ayant acquis les images de 2012 et la Vallée d'Aoste ne nous a pas permis de travailler sur celles-ci. L'étude s'est donc recentrée sur les années 1999 et 2005 en gardant la volonté de travailler sur l'ensemble de la vallée.
Il a fallu essayer d'automatiser la méthode afin de pouvoir traiter tous les glaciers. Pour cela nous avons repris la méthode de classification automatique des pixels, utilisée par Mazué et Payre, et tenté de développer une méthode plus précise par le biais de la classification supervisée. Si la classification supervisée permet d'étudier plusieurs glaciers en même temps à partir d'un même ficher de signature et isole les débris à l'issu du traitement par l'algorithme sur ArcGIS, on peut fortement se questionner sur l'intérêt de cette classification au regard des résultats qu'elle offre.

Premièrement les résultats bruts ne correspondent pas réellement à une classification de la couverture détritique puisque de nombreux polygones sont ajoutés et ne correspondent pas à de la couverture détritique, notamment les zones de crevasses. Cette erreur provient de la couleur des pixels sur laquelle se fonde l'étude.

Deuxièmement pour pallier ces erreurs de classifications, il faut retravailler manuellement les résultats et éliminer les zones mal classées, ce qui enlève totalement le côté automatique de la classification. Or s'il faut retravailler la classification de tous les glaciers d'une vallée, sachant qu'il est nécessaire d'améliorer la classification en amont afin de la rendre précise, il est utile de se poser la question du temps de traitement de cette méthode comparée à une méthode totalement manuelle comme celle employée pour les années en données *open layers*. En effet la classification supervisée nécessite une bonne sélection de polygones pour créer des fichiers signatures cohérents. Le temps de traitement pre- et post- classification est long puisqu'il a fallu l'ajuster afin de la rendre plus précise, et éliminer manuellement les polygones mal classés. Alors que la classification manuelle a certes été un peu longue, mais finalement moins longue que tous les processus mis en place pour la classification supervisée.

Il ne paraît pas possible de développer une méthode pouvant séparer la couverture détritique d'un glacier à partir d'images aériennes et avec une classification n'étant fondée que sur la couleur des pixels de l'image , tout simplement parce que les couleurs des pixels se retrouvent dans des zones qui n'appartiennent pas à de la couverture détritique mais seront tout de même classés comme tels par l'algorithme. Il pourrait être envisagé de ne pas sélectionner les pixels ayant des couleurs pouvant poser problème, mais cela entrainerait un manque dans la classification des débris.
Enfin ArcGIS n'est pas un logiciel de classification supervisée, et de nombreuses études s'accordent à dire que les résultats produits par ArcGIS dans ce domaine ne sont pas satisfaisants. On pourrait envisager d'appliquer la méthode de classification supervisée

sur un logiciel de télédétection comme Envy, spécialisé dans la classification pixel, et les résultats pourraient être de meilleure qualité car l'algorithme de classification est sûrement plus développé. Le choix d'algorithme est également plus large, il est donc possible de trouver un algorithme ayant de bons résultats pour la question.

1.2. Erreurs pouvant affecter la méthode mise en place

1.2.1 Biais dans l'échantillon sélectionné

L'échantillon des 13 glaciers a été sélectionné selon les critères suivants : visibilité du glacier sur les images de 1999 et de 2005, visibilité d'une couverture détritique sur le glacier.

Cette sélection introduit de nombreux biais sur les résultats généraux parce que l'on n'étudie finalement que 13 sur les 200 glaciers de la Vallée d'Aoste.
De plus les glaciers que l'on a sélectionné sont tous relativement gros, car ils devaient être visibles sur les deux années, or cette visibilité est due à l'absence de neige sur la partie de la couverture détritique. Comme ces glaciers sont grands, leur langue et donc leur couverture détritique est situé à une altitude inférieure à la plupart des langues glaciaires de la Vallée d'Aoste. Il est donc plus probable qu'elles aient été libres de neige pour les deux années de sélection.
Cela ne veut pas dire que d'autres glaciers plus petits et plus hauts en altitude ne présentent pas de couverture détritique et n'auraient pas été intéressants à étudier entre 1988 et 2012. Ils n'ont simplement pas été retenus lors de la sélection des 13 glaciers. Cette sélection entraine un biais car les glaciers sélectionnés ne correspondent pas à un échantillon réaliste des glaciers de la Vallée d'Aoste, majoritairement plus petits.

En effet si on observe la superficie totale couverte par les glaciers en Vallée d'Aoste en 1999, soit 153 km^2 pour 214 glaciers d'après l'inventaire effectué par la Fondation Montagne Sûre, la superficie moyenne par glacier est de 0,7 km^2. En 2005 la superficie couverte par glacier était de 135 km^2 pour 210 glaciers, toujours d'après l'inventaire de la Fondation Montagne Sûre, soit une superficie moyenne de 0,7 km^2.
La superficie moyenne de notre échantillon est de 4,74 km^2 en 1999 et de 4,44 km^2 et en 2005. L'échantillon n'est donc pas du tout représentatif de la majeur partie des glaciers du Val d'Aoste et c'est la raison la plus probable pour laquelle les résultats ne correspondent pas aux attentes concernant l'évolution de la couverture détritique et de la surface des glaciers. On peut donc se demander quelle est la réelle représentativité de l'échantillon sélectionné par rapport aux glaciers de la Vallée d'Aoste.

1.2.2 Distinction entre couverture détritique et voile détritique

Une partie du biais de l'étude peut également provenir du fait que le voile détritique n'a été pris en compte que pour le glacier du Valtournanche pour lequel il était particulièrement remarquable.

En effet le voile détritique a une action opposée à la couverture détritique. Il augmente

la fusion de la glace alors que la couverture protège la glace des rayonnements solaires. Ponctuellement certaines zones de voile détritique ont pu être observées. Cependant il était impossible de prendre en compte ces zones dans la classification automatique tant les pixels auraient eu des couleurs similaires et les confusions auraient été importantes. De plus manuellement même s'il avait été possible de distinguer certaines parties de voile détritique, les zones sont si ponctuelles qu'il aurait été difficile de conduire une réelle étude sur l'évolution du voile sur toutes les années.
En effet pour aucun glacier il n'y avait du voile visible pour les 5 années mis à part pour le glacier de Valtournanche.

Enfin distinguer ce qui appartient à du voile ou de la couverture détritique par le moyen seul d'images aérienne est difficile. Nous avons appelé « couverture détritique » les zones ayant une texture, des blocs de plus grande taille pouvant être distingués malgré la résolution des images les plus anciennes. Le voile détritique a été considéré comme n'ayant pas cette texture et surtout comme ayant une certaine transparence permettant de distinguer la glace.
Pour autant la définition de voile détritique est qu'il est inférieur à 2 cm d'épaisseur. Cette définition ne signifie pas forcément qu'il est possible de voir la glace sous jacente. Cela élimine la texture granuleuse visible sur les images, mais ne veut pas forcément dire que toutes les zones prises en compte dans ce que nous avons appelé couverture détritique sont épaisses, même si ça doit être le cas pour la majeure partie des glaciers de l'étude. Le voile détritique peut se localiser sur les zones de transition entre glace et débris.

2. Apport d'autres méthodes pouvant améliorer la classification des débris

1.2 Apport des images satellites

Le problème des images aériennes étudiées est leur manque de résolution spectrale. Les bandes pouvant être utilisées ne sont que les bandes de lumière visible rouge, vert, bleu.
La télédétection utilise des images satellites qui contiennent différentes longueurs d'ondes (lumière visible, infrarouge, ultraviolets, etc.) reflétées à la surface de la Terre. Chaque objet (glace, roche, végétation, etc.) possède une reflectance différente dans ces différentes ondes, et grâce aux informations contenues dans les images satellites il est possible de caractériser un objet sans être allé sur le terrain. La classification automatique à partir d'image satellite est un processus dont les résultats sont très satisfaisants pour les glaciers blancs. Les parties couvertes de débris sont à l'origine d'erreur d'omission (parties couvertes de débris non cartographiées) et de commission (lacs turbides cartographiés mais n'appartenant pas au glacier) qui doivent être corrigées manuellement ce qui peut prendre beaucoup de temps selon les erreurs (Racoviteanu et al. 2010).

1.2.1 Télédétection orientée pixel

La classification orientée pixel considère chaque pixel de l'image individuellement. Les pixels d'une image satellite contiennent des informations de reflectance. Au moyen

d'indices faisant le ratio entre les ondes il est possible de déterminer la nature de chaque pixel. La bande thermique des images ASTER permet de localiser les débris supraglaciaires, qui sont plus froids que les débris n'étant pas sur le glacier et de créer une couche vecteur. En utilisant le proche infrarouge et la lumière visible il est également possible d'isoler dans une autre couche les limites du glacier blanc. Enfin grâce au MNT et à ses dérivés contenant la pente, et les profils horizontaux et verticaux, le périmètre du glacier peut être déterminé et isolé (Bhardwaj et al. 2014). Ces trois couches superposées donnent une classification finale avec le glacier blanc et le glacier couvert de débris.

1.2.2 Télédétection orientée objet

Contrairement à la classification orientée pixel, la classification orientée objet considère un groupe de pixels plutôt qu'un pixel unique. La première étape de la classification objet est la segmentation de l'image, il faut séparer l'image en groupes de la taille des objets que l'on veut représenter. C'est une étape délicate et la segmentation doit être choisie avec soin afin d'obtenir de bon résultats (Rastner et al. 2014). L'algorithme utilisé est une segmentation multi résolution avec différentes données : le rouge, le proche infrarouge, l'infrarouge thermique et la pente. Puis des règles sont créées afin de classer chaque objet. Les règles prennent en compte la température du sol pour déterminer les débris supraglaciaires ainsi que la pente, car les débris ne peuvent se trouver sur une forte pente. La glace est déterminée par un ratio entre le rouge et le proche infrarouge. Après la classification il est possible de retravailler la carte en utilisant les relations de voisinage pour affiner la classification. Rastner et al. (2014) a effectué une comparaison entre les deux méthodes de télédétection et montre que pour un même glacier la classification orientée objet a de meilleurs résultats de classification que la classification orientée pixel.

1.3 Apport de la 3D

Une autre solution qui pourrait être envisagée afin d'améliorer la méthode de classification est l'utilisation de données Lidar ou de photogrammétrie oblique pour obtenir un nuage de point 3D qui permettrait d'avoir une image très précise de la surface du glacier et ainsi améliorer la définition du périmètre du glacier et la délimitation des débris.
Pour la délimitation du périmètre du glacier, il est difficile de trouver exactement où le glacier commence parce que les débris masquent les limites. Avec une information de relief les limites du glacier sont plus faciles à trouver puisque le glacier est bombé alors que les marges sont plates ou déprimées. De plus la texture des débris est particulièrement visible sur une image en 3D, ce qui peut permettre de classer automatiquement les débris par une analyse de texture sur un logiciel permettant cela. Par exemple sur eCognition, logiciel de classification orientée objet il est possible de prendre en compte des dérivés de MNT et de classer un objet grâce à ses dérivés.

2. Interprétation des résultats pour les 13 glaciers sélectionnés

2.1 Intérêt de l'altitude maximum

L'un des indicateurs de l'évolution de la couverture détritique que nous avons tenté de mettre en place est l'altitude maximale de la couverture détritique. Les résultats ont montré que cet indicateur est très variable et aucune tendance nette n'a semblé se dessiner.
Cependant le manque de tendance nette peut être lié à la difficulté à définir ce qu'est le point le plus haut de la couverture détritique. En effet, pour la plupart des glaciers on retrouve des débris, qui ont été classé en couverture détritique, à une altitude supérieure à ce que l'on appelle réellement couverture détritique selon la définition de Kirkbride c'est-à-dire une couverture détritique continue.
Pour autant dans de nombreux cas, la couverture détritique n'est pas toujours continue et les différents groupes de débris peuvent être proches les uns des autres mais ne pas être en contact. Dans la dynamique de la couverture détritique, ces groupes de débris semblent appartenir à un même ensemble.

Sur la figure 48 on peut observer ce problème de définition du point le plus haut de la couverture détritique. Le point numéro 1 est plus haut en altitude que le point numéro 2, mais ne fait pas partie de la couverture détritique continue parce qu'il y a une zone de glace entre ce groupe et les débris recouvrant la langue du glacier. Le point numéro 2 est le point le plus haut de la couverture détritique continue au sens strict, mais prendre en compte ce point serait nier la dynamique de couverture détritique dont semble faire partie le point n°1 et le groupe de débris situés entre les deux points. Placer le point d'altitude maximale n'est de ce fait pas aisé, et les résultats dépendent beaucoup de ce que l'on considère comme étant le point d'altitude maximale de la couverture détritique.

Un autre biais de cet indice est dû au fait que l'altitude des points a été calculée par rapport au MNT de 2008, or il est possible que l'épaisseur de glace ait diminuée en 2008 par rapport au début de notre étude en 1988. Cette marge d'erreur n'est peut être pas très grande

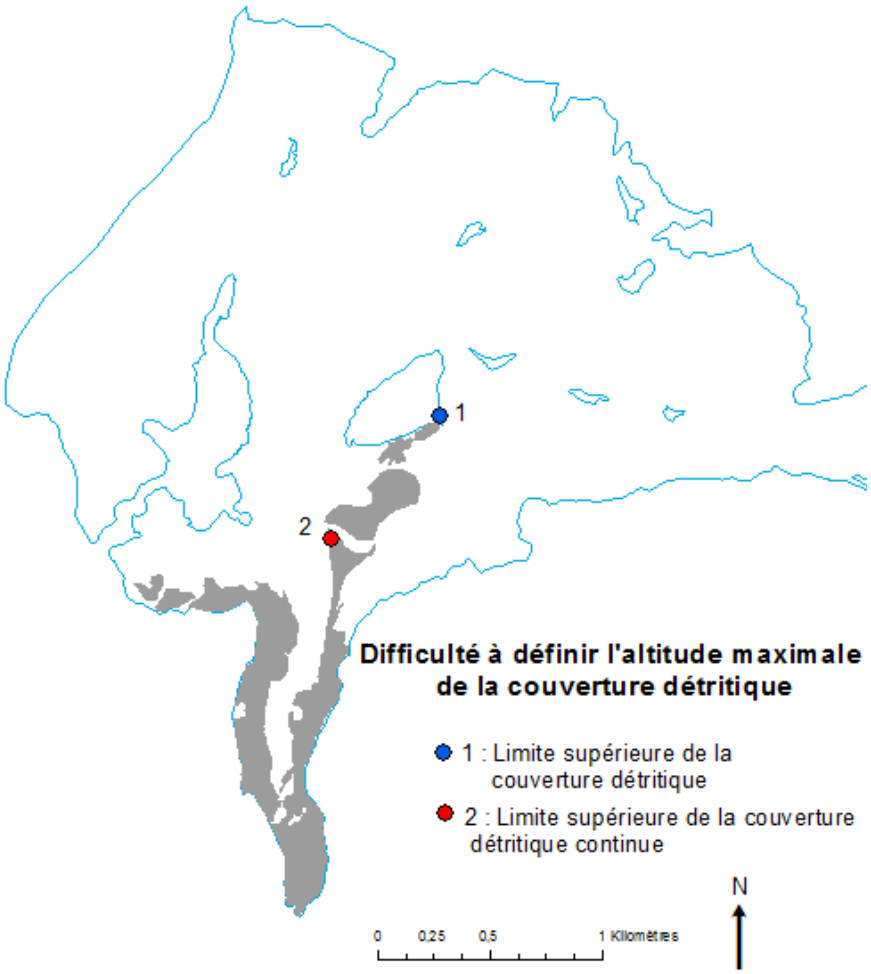


Figure 48 Extension maximale de la couverture détritique du glacier de Grande di Verra en 2012 illustrant la difficulté à déterminer l'altitude maximale de couverture détritique

mais elle doit être prise en compte dans les résultats.

Une solution pour s'affranchir de ce problème de définition du point le plus haut de la couverture détritique serait de calculer le barycentre de la couverture détritique. Le barycentre est le centre de gravité des polygones de couverture détritique, il permet donc d'observer une élévation ou non de l'ensemble des débris et non pas du point le plus haut qui peut être discutable.

2.2 Dynamique de la couverture détritique

L'étude de la couverture détritique est intrinsèquement liée à l'étude des changements de bilan de masse d'un glacier. Nous ne disposons pas de données sur le bilan de masse mais l'évolution de la surface du glacier en donne tout de même une indication.
Notre hypothèse de départ était que la couverture détritique allait augmenter avec le retrait des glaciers. Les courbes d'évolution du pourcentage de couverture détritique montrent une grande diversité de changements pour chacun de glacier de la sélection, c'est pourquoi nous allons tout d'abord discuter leur évolution avant de discuter l'évolution générale.

2.2.1 Estelette

Pour le glacier d'Estelette l'augmentation de la couverture détritique a suivi la diminution de la superficie du glacier, même si l'on peut observer une accélération du pourcentage de couverture détritique entre 1999 et 2005 (figure 49). Si le retrait de la langue a pu affecter les débris en place et les retirer du pourcentage de couverture, l'apport de sédiments a comblé le retrait glaciaire. Le manque de données pour 2012 ne permet pas de savoir si la couverture détritique a continué à augmenter fortement ou a baissé comme c'est le cas pour la majeure partie des glaciers de l'étude.

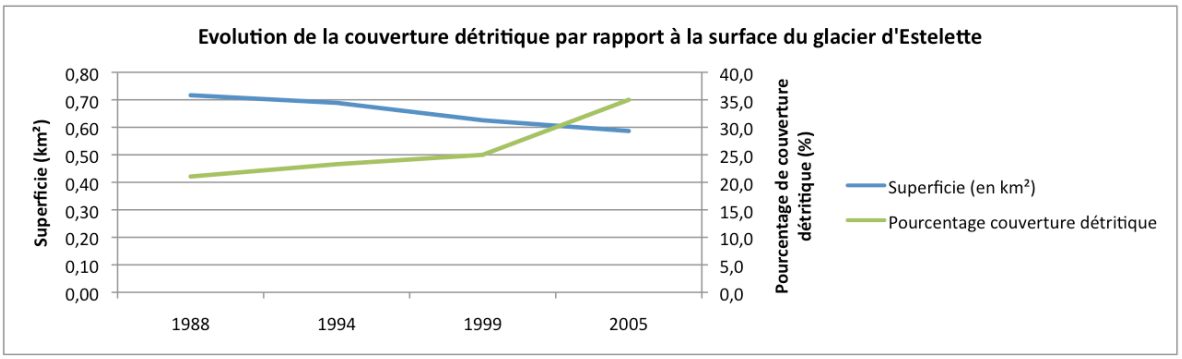


Figure 49 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier d'Estelette

2.2.2 Lex Blanche

Si la superficie du glacier de Lex Blanche a diminué continuellement entre 1988 et 2012, le pourcentage de couverture détritique a d'abord diminué puis augmenté à partir de

1999 (figure 50). Entre 1988 et 1999 la diminution du pourcentage de couverture détritique est le résultat du retrait de la langue glaciaire couverte de débris, alors qu'à partir de 2005 une accumulation plus importante de matériel, notamment à une altitude plus élevée, a provoqué l'augmentation du pourcentage de couverture détritique. La courbe de couverture détritique n'est inverse à la courbe de superficie qu'à partir de 1999.

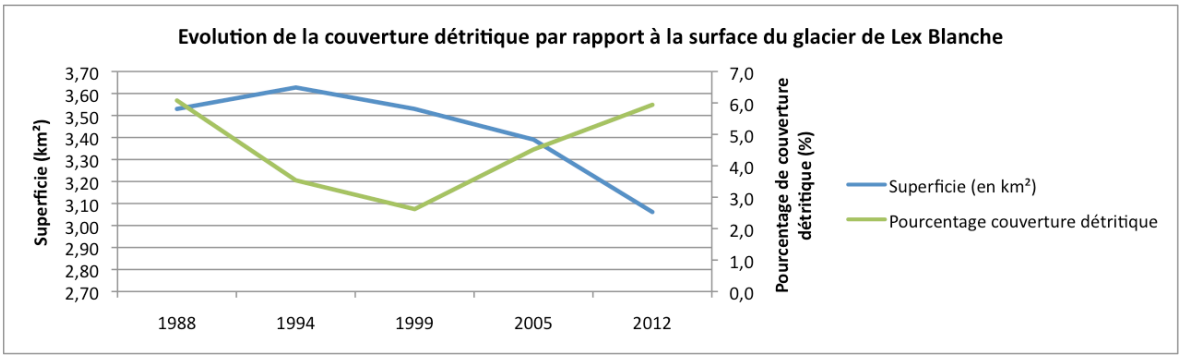


Figure 50 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Lex Blanche

2.2.3 Miage

Si la superficie du glacier du Miage a peu évolué entre 1988 et 2012, les résultats montrent tout de même une évolution plus importante de la couverture détritique (figure 51), surtout compte tenu de la très légère diminution de superficie. Le maximum de couverture détritique est atteint en 2005 (41,2%) par une densification au niveau du haut de la langue. La légère diminution de 2012 peut être expliquée par le fait que le matériel détritique que l'on trouve sur les glaciers alimentant la langue du Miage a pu être intégré dans le corps du glacier par le biais des crevasses qui sont situées à la jointures de la langue et des glaciers. En 2012 la couverture détritique est plus élevée en altitude qu'en 2005. Cela est dû à un dépôt d'écroulement de juillet 2012 provenant de la paroi rocheuse adjacente au Miage.

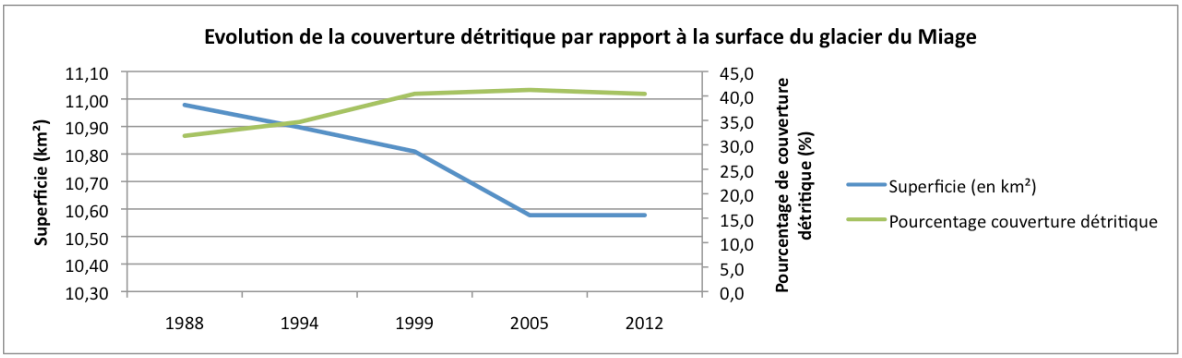


Figure 51 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier du Miage

2.2.4 Brenva

Le glacier de Brenva présente une dynamique détritique originale par rapport aux autres glaciers de l'étude avec un pic de pourcentage de débris atteint en 1999. La couverture détritique en 1999 s'étend sur toute la moitié droite du glacier, alors qu'elle

se concentre habituellement principalement sur la langue et par petits groupes sur le glacier principal. Ce pic est dû à un dépôt d'écroulement ayant eu lieu le 18 janvier 1997 et n'ayant pas encore été intégré au glacier. D'ailleurs ce dépôt d'écroulement est très proche de la paroi rocheuse ce qui laisse penser à un écoulement surfacique de la glace très lent à cet endroit, ou à des processus d'éboulisation survenus après l'écroulement qui continuent à alimenter la bande de couverture détritique en 1999. Pour que le dépôt soit encore largement visible il est possible de supposer que les conditions climatiques entre 1997 et 1999 aussi bien hivernales (accumulation de masse par le biais de précipitations neigeuses) qu'estivales (ablation de masse par fusion de la glace) ont été défavorables au glacier, avec sûrement peu d'accumulation et une forte ablation.
En 2005 et 2012, la couverture détritique redevient proche de ce qu'elle était avant les images de 1999, avec 20,3% de débris. Le dépôt d'écroulement n'est plus visible, ce qui suggère qu'il a été en grande partie intégré au corps du glacier (figure 52).

La superficie de Brenva a diminué de 1988 à 2005 mais légèrement augmenté entre 2005 et 2012 passant de 6,59 km2 à 6,77 km2. Cette légère augmentation est due à un agrandissement de la langue glaciaire séparée du glacier depuis les images de 2005. En effet cette langue est alimentée par la chute de séracs de la partie supérieure. En 2012 on peut penser que plus de séracs ont chuté, provoquant une augmentation du volume de la langue par le haut.

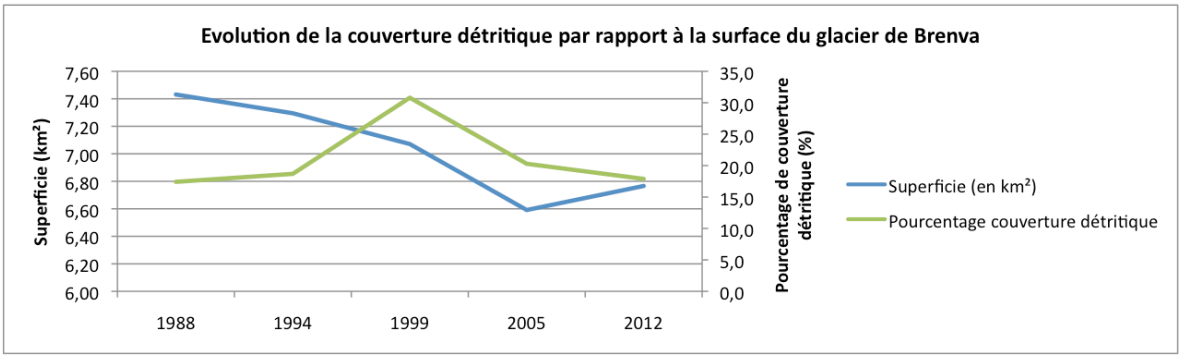


Figure 52 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Brenva

2.2.5 Rochefort

La couverture détritique du glacier de Rochefort a été assez faible entre 1988 et 1994. En 1999 un groupe de débris proche de la paroi rocheuse laisse penser à un récent dépôt. En 2005 la superficie du glacier est de 1,08 km2 pour 16,2% de couverture détritique et les débris couvrent l'ensemble de la langue du glacier. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer cette forte augmentation. Le glacier de Rochefort est très accidenté et crevassé c'est le signe d'un écoulement rapide de la glace. Il est possible que le début de dépôt observé en 1999 ait grandi et atteint le front du glacier en quelques années, d'autant plus que le glacier n'est pas très long.

Cependant si le glacier est très accidenté il est probable que les débris soient rapidement assimilés au corps du glacier en tombant dans des crevasses ce qui peut contredire l'hypothèse précédente. On peut penser qu'un dépôt récent est à l'origine de cette forte accumulation de matériel. Pour pouvoir avoir plus d'explication il faudrait exploiter des

images récentes, malheureusement les images de 2012 n'étant pas exploitables on ne peut comprendre réellement cette rapide augmentation.

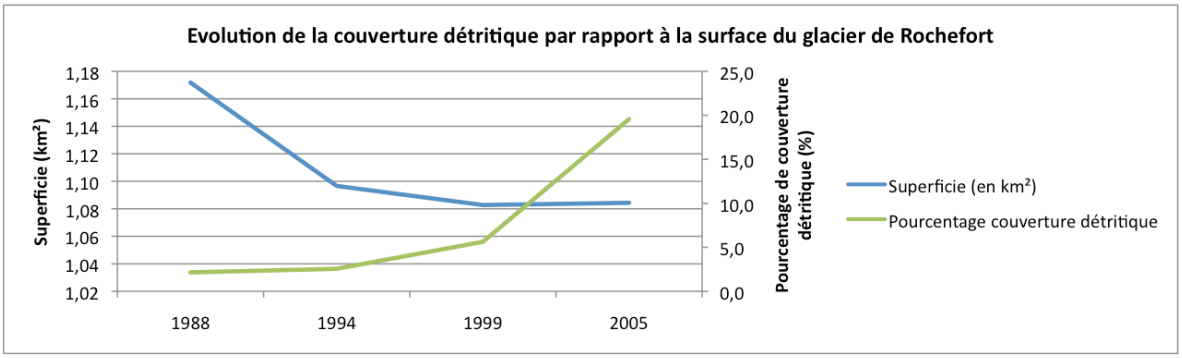


Figure 53 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Rochefort

2.2.6 Triolet

La couverture détritique de Triolet a augmenté régulièrement tout au long de l'étude, alors que sa superficie a diminué. Le retrait du front et son détachement on été compensés par une élévation en altitude des débris et une forte densification des moraines médianes du glacier. De plus les données montrent plusieurs dépôts d'écroulement qu'il est possible de suivre tout au long des années.
Ces dépôts sont également des indicateurs d'une dynamique sédimentaire active sur les parois du glacier qui alimente régulièrement la couverture détritique. Ainsi la perte des débris ayant été enlevés du glacier par le retrait est compensée par l'apport de matériel, ce qui augmente finalement le pourcentage de couverture détritique.

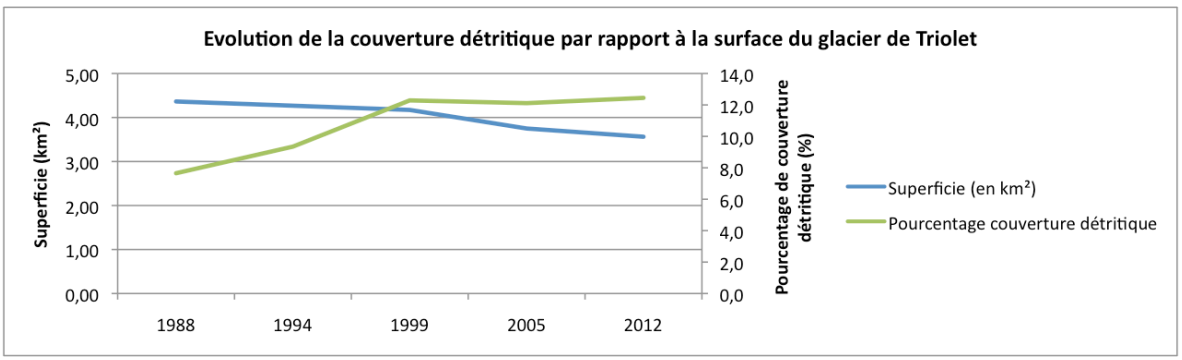


Figure 54 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Triolet

2.2.7 Pre de Bar

La couverture détritique du glacier de Pre de Bar est maximale en 1994. Après cette date elle décroit jusqu'en 2012. La couverture détritique est ici affectée par le retrait glaciaire. En effet la majeure partie des débris sont localisés sur la langue qui perd en surface chaque année. En amont la couverture détritique tend à se développer en altitude mais ce phénomène se produit moins rapidement que la perte des débris situés sur la langue. Par rapport au glacier de Triolet dont nous avons discuté la dynamique sédimentaire précédemment, nous pouvons émettre l'hypothèse que l'apport en

matériel du glacier de Pre de Bar n'est pas assez rapide pour compenser la perte des débris de la langue. Ainsi le pourcentage de couverture détritique diminue au cours de l'étude.

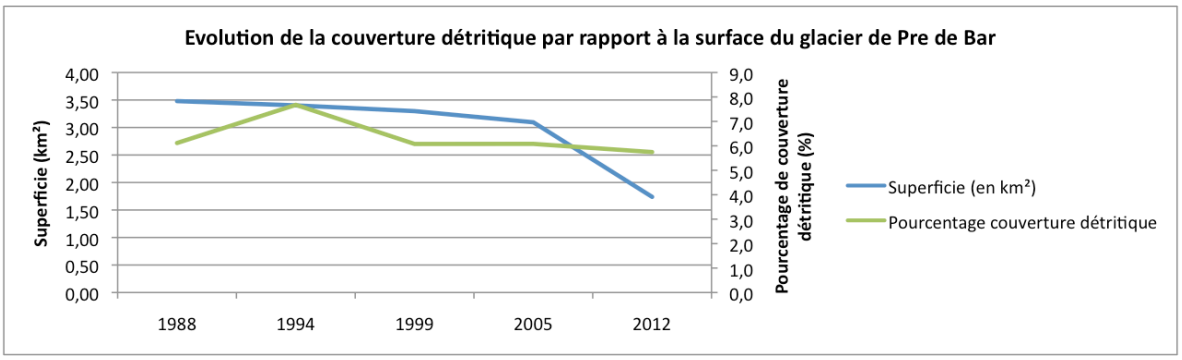


Figure 55 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Pre de Bar

2.2.8 Valtournanche

Valtournanche est le seul glacier pour lequel le voile a été pris en compte dans le cadre de cette étude. Son effet est contraire à la couverture détritique : il augmente l'ablation glaciaire. Sur le graphique on remarque un développement inverse du voile et de la superficie entre 1994 et 2005. Ce qui est également visible sur les cartes de résultats : où l'on trouve du voile détritique, notamment sur la langue gauche, il y a un retrait glaciaire marqué. La langue droite non couverte de voile détritique ne semble pas se retirer aussi rapidement que la langue gauche. La présence du voile détritique n'est peut être pas la seule explication à prendre en compte, d'autant plus que nous n'avons qu'un seul exemple de glacier avec voile détritique mais sur les images il semble bien y avoir une action du voile sur l'ablation glaciaire.
Les résultats ont également tendance à montrer que le voile détritique précède la couverture détritique. En effet la couverture détritique de la langue gauche a eu tendance à se densifier entre 1988 et 2012, au même endroit où le voile détritique était le plus présent. La couverture est même parfois localisée au même endroit que le précédent voile, ce qui montre que le voile est une transition entre glace non couverte et débris.

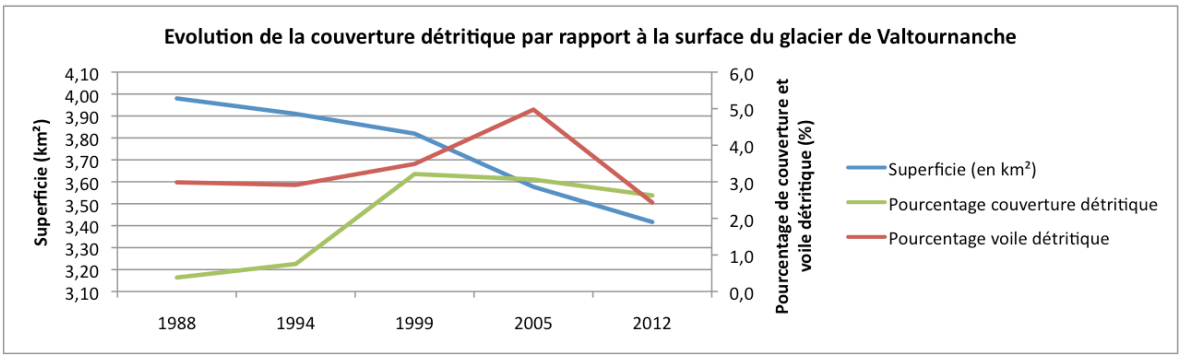


Figure 56 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Valtournanche

2.2.9 Grande di Verra

Entre 1994 et 2005 le graphique figure 57 montre évolution inverse de la couverture détritique de Grande di Verra et de sa superficie. Cette dynamique s'explique par une remontée et une densification de la couverture détritique qui permet de compenser le retrait de la langue glaciaire.
Entre 2005 et 2012 le pourcentage de couverture détritique diminue légèrement alors que la superficie de change pas. Cette diminution est le résultat de la formation de lacs sur-glaciaires formés sur la langue et à l'emplacement d'anciens débris.

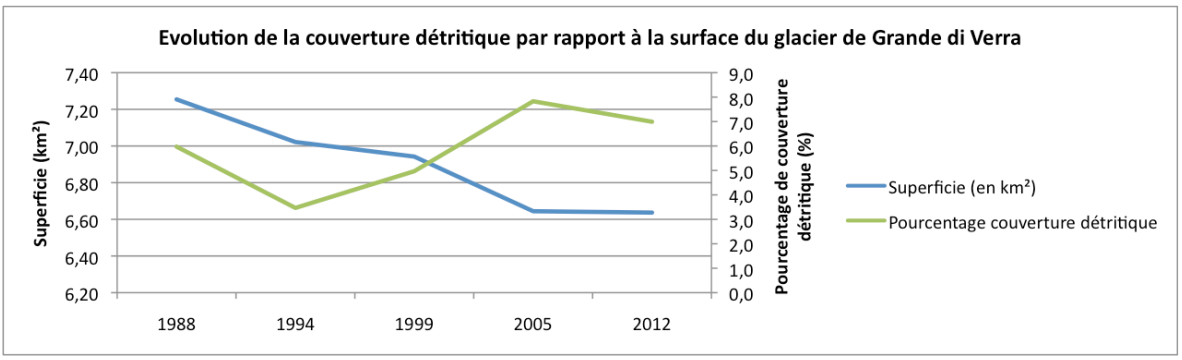


Figure 57 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Grande di Verra

2.2.10 Piccolo di Verra

La couverture détritique de Piccolo di Verra a d'abord fortement augmenté entre 1994 et 1999, puis diminué jusqu'en 2012.
L'augmentation s'explique par une forte densification de la couverture détritique sur le côté droit de la langue mais aussi par une densification de la moraine médiane. Un dépôt de débris se forme également sur le petit morceau de langue à gauche de la langue principale. La légère diminution du pourcentage de couverture ne semble être dû qu'à la perte de superficie sur les zones couvertes de débris en 1999 et à un rétrécissement de la partie supérieure de la moraine médiane. Elle s'explique donc par une diminution de la dynamique sédimentaire alimentant le glacier et ne permettant pas de compenser la perte des débris localisés sur la langue.

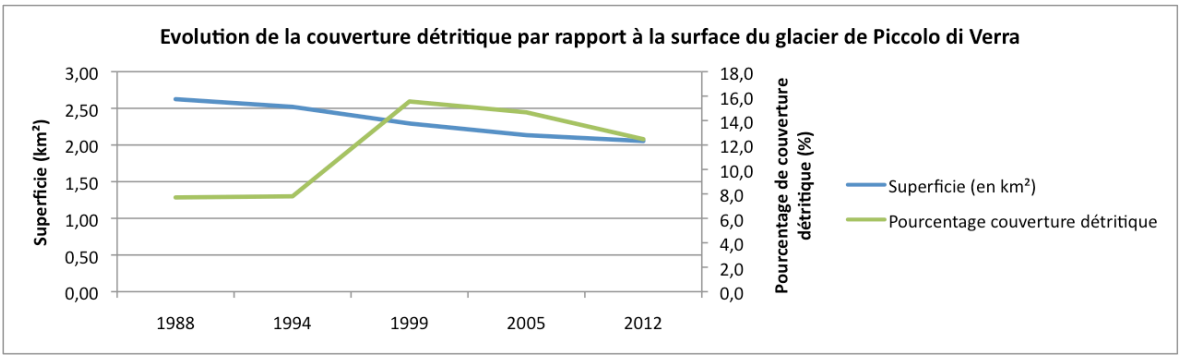


Figure 58 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Piccolo di Verra

2.2.11 Lys

La comparaison entre la courbe d'évolution de superficie et la courbe d'évolution de pourcentage de couverture détritique du glacier du Lys montre une relation inverse entre 1988 et 1994 et entre 1999 et 2005. En 2012 le pourcentage de couverture détritique diminue alors que la superficie est pratiquement la même qu'en 2005. Cette diminution est le résultat d'un agrandissement des lacs situés sur la langue du glacier, dont la surface fait donc partie du glacier, mais qui ne sont plus couverts de débris. L'action des lacs sur-glaciaires va beaucoup affecter la couverture détritique puisqu'ils participent à l'ablation du glacier en fragilisant et en faisant s'effondrer des pans de glaciers couverts.

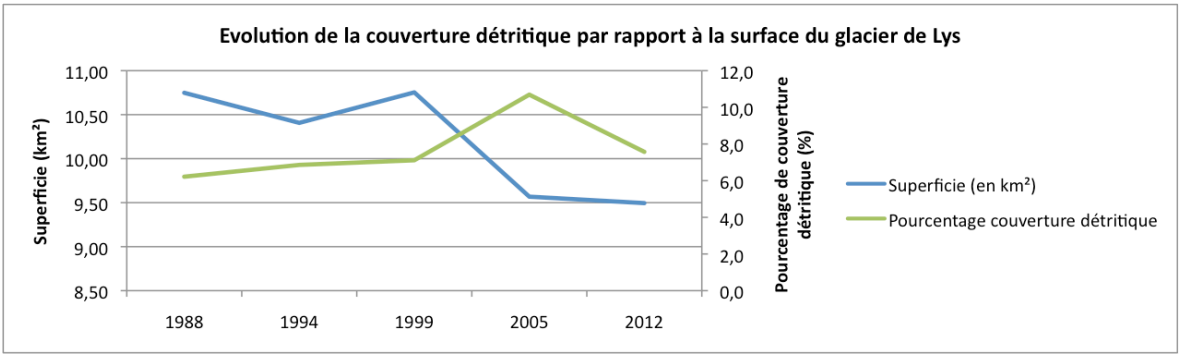


Figure 59 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Lys

2.2.12 Lavacciu

La courbe d'évolution de couverture détritique de Lavacciu est inverse à celle de diminution de superficie entre 1994 et 2005. Entre 2005 et 2012 le pourcentage de couverture détritique diminue alors que la superficie n'évolue pas. La perte de débris est le résultat d'une diminution de couverture sur le côté de la langue. Ce côté n'a pas été affecté par un retrait glaciaire, les raisons de diminution de pourcentage de débris peuvent être une diminution de la dynamique sédimentaire alimentant le glacier en débris.

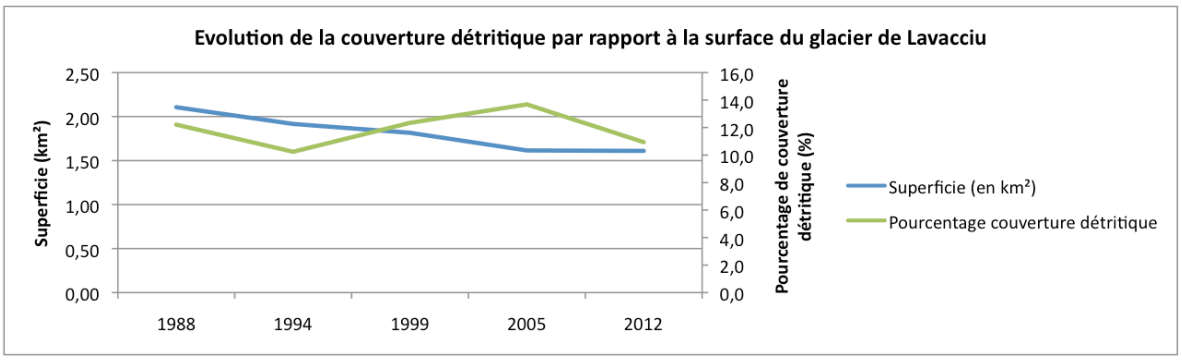


Figure 60 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Lavacciu

2.2.13 Tribolazione

Le glacier de Tribolazione est le glacier avec le moins de pourcentage de couverture détritique de tous les glaciers de la sélection.
La couverture détritique n'a augmenté qu'entre 1994 et 1999. La perte de débris est le résultat du retrait glaciaire mais le peu d'augmentation laisse penser que la dynamique sédimentaire est faible.

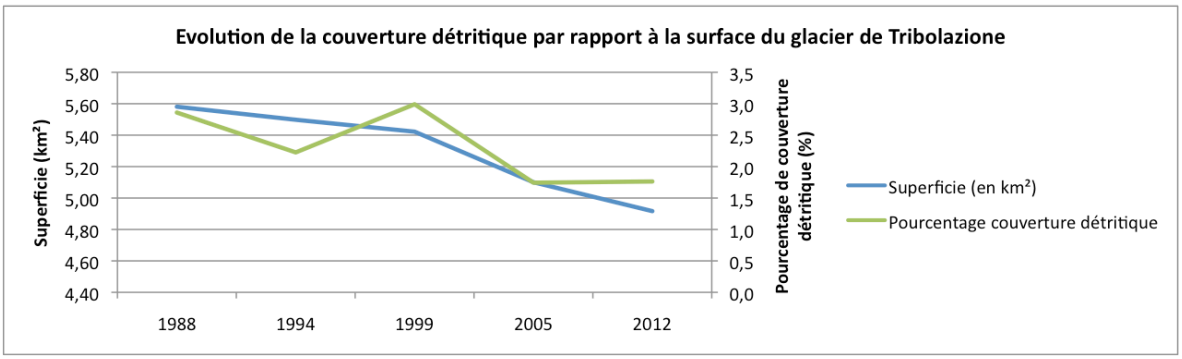


Figure 61 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Tribolazione

2.3 Typologie d'évolution de la couverture détritique

2.3.1 Les glaciers dont l'évolution de la couverture détritique et de la superficie est faible

Le glacier du Miage et de Brenva, si l'on met de côté les données de 1999, n'ont pas subi de grosse évolution de superficie et de couverture détritique. Ce sont aussi les glaciers les plus couverts de l'étude. On peut les considérer comme des glaciers noirs selon la définition de Kirkbride, plus de la moitié de leur zone d'ablation est couverte de débris.
Si l'on observe une remontée en altitude des débris et des phénomènes de dépôts d'écroulement montrant une dynamique sédimentaire active, le front de ces glaciers n'a pas évolué durant les 25 ans de l'étude.
Pour les plus gros glaciers couverts, il est donc possible de considérer au vu de nos résultats que la couverture détritique a joué son rôle protecteur des rayonnements solaires, ce qui a contribué à diminuer le recul du front.

2.3.2 Les petits glaciers dont l'évolution de la couverture détritique est rapide

Rochefort et Estelette sont les deux plus petits glaciers de l'étude, ce sont aussi les deux pour lesquels la couverture détritique a fortement augmenté entre 1999 et 2005. Si pour Estelette le retrait glaciaire est plus marqué que pour Rochefort, il n'empêche que leur progression rapide de couverture détritique les rapproche.
Cependant, pour aucun de ces glaciers les images de 2012 ont pu être exploitées ce qui ne permet pas de comprendre si cette rapide évolution est ponctuelle ou suivie dans le temps.

2.3.3 Les glaciers dont la couverture détritique a suivi l'évolution inverse de la superficie

Plusieurs glaciers de l'étude ont connu une évolution inverse de la couverture détritique et de leur superficie. Bien souvent cette évolution ne concerne pas toutes les années de l'étude mais seulement une partie.
Ces glaciers sont Lex Blanche, Estelette, Triolet, Grande di Verra et Lys. Tous ces glaciers ont connu une diminution de leur superficie qui aurait pu affecter leur couverture détritique. Cependant on remarque que la perte des débris localisés sur le front a été compensée par une accumulation de débris plus importante en altitude, souvent traduite par un allongement des bandes de débris ou une densification de la couverture discontinue. Pour ces glaciers on peut penser que la dynamique sédimentaire alimentant la couverture détritique est forte, même si le Lys et Grande di Verra ont connu une réduction de leur pourcentage de débris entre 2005 et 2012.

2.3.4 Glaciers ayant perdu en superficie et en couverture détritique

Les glaciers de Pre de Bar, Valtournanche, Piccolo di Verra, Lavacciu et Tribolazione ont perdu à la fois en surface mais aussi en pourcentage de couverture détritique durant une partie des années étudiées.
La perte de couverture détritique a toujours été causée par un retrait du front glaciaire couvert de débris. Ce phénomène de retrait de la langue glaciaire couverte de débris a affecté les autres glaciers de l'étude de la même manière. La différence avec le groupe précédent est que la couverture détritique ne s'est pas développée suffisamment en amont pour compenser la perte. Ainsi la diminution du pourcentage de débris peut être causée par une dynamique sédimentaire plus faible, ayant apporté moins de matériel sur glacier et qui n'a donc pas pu compenser la perte de débris de la langue.

2.3. La dynamique de la couverture détritique : un rapport entre ablation et apport de matériel

D'une manière générale, la couverture détritique a évolué en fonction du retrait glaciaire et de l'apport de matériel sur le glacier. Si nous avons pu constater une tendance à l'augmentation de la couverture détritique entre 1988 et 2005 liée à un retrait glaciaire, ça n'a pas été le cas entre 2005 et 2012.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la diminution de la couverture détritique à partir de 2005.
Les langues des glaciers étudiés descendent plus bas en altitude que celles des glaciers blancs puisqu'elles sont protégées par leur couverture détritique. On peut supposer qu'une augmentation des rayonnements solaires entre 2005 et 2012 a mis à mal ces langues basses en altitude, ce qui a provoqué une diminution malgré la couverture de débris.
De plus, si la relation inverse entre pourcentage de couverture détritique et retrait glaciaire est prouvée, il est possible que le temps de réponse de la couverture détritique soit plus long que prévu. Ainsi dans notre cas la couverture détritique n'a pas eu le temps de compenser le retrait glaciaire. Même si l'altitude maximale de la couverture détritique tend à augmenter, il est possible que la couverture n'ait pas eu le temps de

former une bande continue qui aurait augmenté le pourcentage totale de débris par rapport à a surface du glacier.

Le retrait glaciaire s'effectue par différents phénomènes qui ont un impact sur la couverture détritique. On constate que dans de nombreux cas (Pre de Bar, Triolet, Brenva …), la langue s'est détachée du bassin d'accumulation. Cela met à jour des parties de glace sur de la roche dont la conductivité thermique est forte. La diminution de surface s'accélère dès que le glacier est séparé de sa source d'alimentation. De plus si le glacier est isolé du bassin d'accumulation, il est également isolé du système de transport du matériel par le glacier. Cela peut expliquer que la couverture détritique a du mal à compenser la perte de surface au niveau de la langue détachée.
De plus, des lacs supraglaciaires se font formés sur les zones de débris (Triolet, Lys). Ces lacs vont également être une source de conductivité thermique et favoriser l'ablation par vêlage de morceaux de glace qui agrandissent le lac, qui impact ainsi une plus grande surface, et dégrade plus de surface glaciaire.

Enfin il faut également prendre en compte le fait que la couverture détritique n'est pas le reflet unique de processus glaciologiques, mais est lié à des processus géomorphologiques qui alimentent le glacier en matériel. La couverture détritique est liée au bilan sédimentaire qui correspond au rapport entre les entrées et les sorties de débris qui transitent à l'intérieur du glacier (Deline, 2002). Ainsi la diminution de la couverture détritique entre 2005 et 2012 n'est peut-être pas forcément due à un changement dans la dynamique glaciaire, mais peut-être à un changement dans la dynamique sédimentaire. Même si cette hypothèse semble étonnante, au regard du récent dépôt d'écroulement sur le glacier du Miage que l'on observe sur les images de 2012, elle peut être un facteur à prendre en compte dans la diminution du pourcentage de couverture détritique de certains glaciers.

2.4 Observations menées sur d'autres études

Nos résultats n'ont pas montré de réelle tendance à l'évolution inverse de la couverture détritique et de la superficie du glacier. Afin de valider nos résultats nous avons voulu les comparer à d'autres études menées sur la couverture détritique de glaciers des Alpes.

Des études menées ponctuellement sur différents glaciers des Alpes : Estelette (Mazué et al. 2009), Gébroulaz et Evettes (Perrel, 2012), Mer de Glace (Martin, 2011) et menée sur des années similaires voire antérieures aux nôtres ont montré une augmentation de la couverture détritique et une diminution de la surface glaciaire. Cependant ces études se terminent en 2005, 2006 ou 2008 soit un peu avant la nôtre.
Ces résultats concordent avec ceux observés dans notre étude, puisque nous avons également observé une tendance à l'augmentation de la couverture détritique jusqu'en 2005. Le manque de données entre 2005 et 2012 pour les études évoquées ne permet pas de comparer la diminution observée entre 2005 et 2012.

La thèse de Marie Gardent (2014) sur les glaciers des Alpes contient quelques études sur l'évolution de la couverture détritique de 560 glaciers des Alpes entre 2006 et 2009. Elle permet d'obtenir une vision plus large de l'évolution de la couverture détritique.

Les résultats du rapport entre le retrait glaciaire et l'extension de la couverture détritique montrent des disparités très grandes entre les différents glaciers. Certains glaciers présentent un retrait glaciaire inférieur à 5%, alors que d'autres ont perdu près de 40% de leur surface du début de l'étude. La conclusion donnée par Marie Gardent est que « l'extension actuelle (2006-2009) de la couverture détritique ne semble donc pas induire systématiquement un retrait glaciaire modéré, même si cela est vrai dans la majorité des cas ». Cette conclusion peut se rapprocher de la nôtre, car certains glaciers de l'étude n'ont pas confirmé l'hypothèse de départ que nous avions formulé : la couverture détritique limite le retrait glaciaire, et les glaciers ont connu des fluctuations de pourcentage de couverture détritique, alors que leur surface diminuait. L'étude de Marie Gardent tend à montrer qu'il existe une grande variété de réponse de couverture détritique et de retrait glaciaire lorsque l'on étudie de nombreux glaciers. Ces disparités ont également été mises en avant par notre sélection de 13 glaciers.

Conclusion

Les méthodes automatique et supervisée mises en place pour l'étude de l'évolution de la Vallée d'Aoste ont montré certaines faiblesses pour la cartographie des débris. Les résultats ont nécessité un retravail manuel conséquent, ce qui permet de douter de leur efficacité. L'étude manuelle des 13 glaciers sélectionné est peut être moins précise, mais plus rapide à exécuter et a permis de travailler sur 3 années différentes pour 13 glaciers en un temps assez court.

La représentativité de l'échantillon que constituent les 13 glaciers sélectionnés peut être discutable, d'autant plus que les résultats ne montrent pas de tendance nette lorsque l'on considère 13 glaciers, et que faire une typologie à partir de 2 glaciers peut sembler un peu poussif. Cependant nous avons pu distinguer différents types de comportements de dynamique de la couverture détritique par rapport au retrait glaciaire.

Si notre hypothèse de départ était que la couverture détritique allait augmenter à mesure que la superficie diminue, elle n'a pas été vérifiée pour tous les glaciers durant toute la durée de l'étude. Certains glaciers ont connu cette courbe inverse qui se traduit par une augmentation de l'accumulation sédimentaire en amont du glacier. D'autres n'ont pas pu compenser la perte de superficie au niveau de langue et on vu leur couverture détritique diminuer. Enfin les glaciers les plus couverts n'ont pas beaucoup évolué, et ont notamment été protégés du retrait glaciaire.

Ainsi cette étude a surtout mis en avant la diversité de comportement de la couverture détritique pour chaque glacier. L'accumulation de débris à la surface d'un glacier est le résultat d'une dynamique d'ablation mais aussi d'une dynamique sédimentaire. Si l'ablation est forte, mais que peu de matériel est disponible le glacier ne pourra pas compenser la perte de débris. En revanche lorsque du matériel est disponible on observe une remontée en altitude de la couverture détritique.
Enfin pour ce qui est du rôle protecteur de la couverture détritique, il ne se vérifie que pour les véritables glaciers noirs (Miage et Brenva), car tous les autres glaciers ont connu une diminution de surface.

Afin de compléter cette étude, les perspectives de recherches suivantes pourraient être développées :

- Etendre l'étude de la couverture détritique à d'autres glaciers du Val d'Aoste à partir des *open layers* fournies par le Geoportale italien. Cela pourrait permettre d'améliorer la typologie d'évolution de la couverture détritique, et peut être mettre en avant des évolutions remarquables que nous n'avons pas pu étudier. Cela pourrait également retirer une partie du biais dans l'échantillon sélectionné.
- Etendre l'étude à d'autres secteurs qui ne sont pas en vallée d'Aoste, en utilisant des ortho-photographies et la méthode manuelle.
- Etendre l'étude à d'autres années à partir d'images aériennes anciennes à ortho-rectifier afin d'avoir une vision plus large de la relation entre couverture détritique et superficie
- Coupler cette étude avec des données glaciologiques afin de dépasser la relation couverture détritique/superficie et de comprendre la relation entre couverture détritique et bilan de masse.

Bibliographie

Benn D. I., and D. J. A. Evans. 1998. *Glaciers and Glaciation.* Arnold, London.

Bhambri, Rakesh, Bolch. 2009. "Glacier Mapping: A Review with Special Reference to the Indian Himalayas." *Progress in Physical Geography* 33 (5): 672–704. doi:10.1177/0309133309348112.

Bhardwaj A., Joshi P. K., Snehmani M. K. S., Sam L., Gupta R. D., 2014. "Mapping Debris-Covered Glaciers and Identifying Factors Affecting the Accuracy." *Cold Regions Science and Technology* 106–107 (October): 161–74. doi:10.1016/j.coldregions.2014.07.006.

D'Agata C., Zanutta A., 2007. "Reconstruction of the Recent Changes of a Debris-Covered Glacier (Brenva Glacier, Mont Blanc Massif, Italy) Using Indirect Sources: Methods, Results and Validation." *Global and Planetary Change*, Climate Change Impacts on Mountain Glaciers and Permafrost, 56 (1–2): 57–68. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.021.

Deline P., 2002, Etude géomorphologique des interactions écroulements rocheux/glaciers dans la haute montagne alpine (versant sud-est du Mont-Blanc), thèse de doctorat, Chambéry, Université de Savoie, 365pp.

Gardent M., 2014, Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, thèse pour l'obtention du grade de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 335pp.

Guisset M., Deline P., 2006, Evolution des couvertures supraglaciaires dans le massif de la Vanoise après, le petit age glaciaire : Glacier de Pramort, glacier inférieur des Balmes, glacier de l'Invernet in « Travaux scientifiques du Parc national de la Vanoise », Tome XXIII, p. 7-27

Kaser G., Cogley J. G., Dyurgerov M. B., Meier M. F., Ohmura A., 2006. "Mass Balance of Glaciers and Ice Caps: Consensus Estimates for 1961–2004." *Geophysical Research Letters* 33 (19): L19501. doi:10.1029/2006GL027511.

Kirkbride M. P., Warren C. R., 1999. "Tasman Glacier, New Zealand: 20th-Century Thinning and Predicted Calving Retreat." *Global and Planetary Change* 22 (1–4): 11–28. doi:10.1016/S0921-8181(99)00021-1.

Kirkbride M.P., Ice-marginal geomorphology and Holocene expansion of debris-covered Tasman Glacier, New Zealand, in NAKAWO M., RAYMOND C.F., FOUNTAIN A., 2000, Debris-Covered Glaciers, IAHS,.264 p : 211-217.

Martin B., 2011, Analyse diachronique de la couverture détritique supraglaciaire de la Mer de Glace (Massif du Mont-Blanc), de 1939 à 2008, mémoire de Master 2, Université de Savoie, Le Bourget-Du-Lac, 111pp.

Mazué R., Deline P., Kirkbride M. P., 2009. “Suivi de L’évolution de La Couverture Détritique D’un Glacier Noir Par Photo-Comparaison: Le Glacier d’Estelette (Massif Du Mont Blanc).” In *Neige et Glace de Montagne : Reconstitution, Dynamique, Pratiques*, 171–78. Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8. https://hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00404051.

Payre A., 2013. Mise À Jour Du Cadastre Des Glaciers de La Vallée d’Aoste, rapport de stage de master 2, Université de Savoie, Le Bourget-du-Lac,

Racoviteanu, Adina E., Frank Paul, Bruce Raup, Siri Jodha Singh Khalsa, and Richard Armstrong. 2010. “Challenges and Recommendations in Mapping of Glacier Parameters from Space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Workshop, Boulder, Colorado, USA.” *Annals of Glaciology* 50 (53): 53–69. doi:10.3189/172756410790595804.

Rastner P., Bolch T., Notarnicola C., Paul F., 2014. “A Comparison of Pixel- and Object-Based Glacier Classification With Optical Satellite Images.” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7 (3): 853–62. doi:10.1109/JSTARS.2013.2274668.

Reynaud L., Vincent C., 1998, Suivis glaciologiques dans les Ecrins 1997, LGGE, Grenoble, 36 pp.

Takeuchi Y., Kayastha R.B, Nakawo M., Characteristics of ablation and heat balance in debris-free and debris-covered areas on Khumbu glacier, Nepal Himalayas, in the pre-monsoon season, in NAKAWO M., RAYMOND C.F., FOUNTAIN A., 2000, Debris- Covered Glaciers, IAHS,.264 pp, p. 53-61

Table des figures

Figure 1 Processus contribuant à la création d'une couverture détritique 11
Figure 2 Modèle TD/AD de l'évolution de la couverture détritique (Kirkbride 2000) 13
Figure 3 Localisation de la Vallée d'Aoste, de ses sous-vallées et des 200 glaciers de la région 14
Figure 4 Regroupement par secteurs des glaciers de la Vallée d'Aoste 17
Figure 5 Histogramme des valeurs en RVB de l'ortho-photographie 1999 du secteur Lys 18
Figure 6 Pixels pouvant poser un problème d'attribution lors de la classification, à gauche des pixels sombre appartenants à des débris et des crevasses, à droite des pixels clairs appartenants à de la neige, de la glace et des débris 21
Figure 7 Résultats de l'application du filtre majoritaire sur la classification brute, l'effet "poivre et sel" est éliminé 22
Figure 8 Comparaison des méthodes de classification de pixels (automatique et supervisée) sur ArcGIS 25
Figure 9 Exemple de mauvaise qualité des images pouvant nuire à la classification 25
Figure 10 Localisation des glaciers sélectionnés dans le secteur Monte Bianco 26
Figure 11 Localisation des glaciers sélectionnés dans le secteur Lys 26
Figure 12 Localisation des glaciers sélectionnés dans le secteur Valsavarenche-Cogne . 26
Figure 13 Périmètre de Piccolo di Verra avant et après avoir été retracé et justifications du nouveau tracé 27
Figure 14 Périmètre de Triolet avant et après avoir été retracé et justifications du nouveau tracé 29
Figure 15 Elimination des polygones mal classés sur la classification supervisée du glacier de Lys en 2005 29
Figure 16 Problèmes de tracé des périmètres de la partie supérieure du glacier de Brenva 30
Figure 17 Evolution de la superficie des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012 34
Figure 18 Evolution du pourcentage de couverture détritique des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012 35
Figure 19 Evolution de l'altitude maximale de la couverture détritique pour les 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012 37
Figure 20 Evolution de la couverture détritique du glacier d'Estelette entre 1988 et 2005 37
Figure 21 Evolution de la superficie du glacier d'Estelette 38
Figure 22 Evolution de la superficie du glacier d'Estelette 38
Figure 23 Evolution de la superficie du glacier d'Estelette 38
Figure 24 Evolution de la couverture détritique du glacier de Triolet entre 1988 et 2012 39
Figure 25 Evolution de la superficie du glacier de Triolet 40
Figure 26 Evolution de la couverture détritique du glacier du Miage entre 1988 et 2012 41
Figure 27 Evolution de la surperficie du glacier du Miage 42
Figure 28 Evolution de la couverture détritique du glacier de Brenva entre 1988 et 2012 43

Figure 29 Evolution de la superficie du glacier de Brenva....44
Figure 30 Evolution de la couverture détritique du glacier de Rochefort entre 1988 et 2005 45
Figure 31Evolution de la superficie du glacier de Rochefort....46
Figure 32 Evolution de la couverture détritique du glacier de Triolet entre 1988 et 2012 47
Figure 33 Evolution de la superficie du glacier de Triolet....48
Figure 34 Evolution de la couverture détritique du glacier de Pre de Bar entre 1988 et 2012 49
Figure 35 Evolution de la superficie du glacier de Triolet....50
Figure 36 Evolution de la couverture détritique du glacier de Valtournanche entre 1988 et 2012 51
Figure 37 Evolution de la superficie du glacier de Valtournanche....52
Figure 38 Evolution de la couverture détritique du glacier de Grande di Verra entre 1988 et 2012 53
Figure 39 Evolution de la superficie du glacier de Grande di Verra 54
Figure 40 Evolution de la couverture détritique du glacier de Piccolo di Verra entre 1988 et 2012 55
Figure 41 Evolution de la superficie du glacier de Piccolo di Verra....56
Figure 42 Evolution de la couverture détritique du glacier de Lys entre 1988 et 2012...57
Figure 43 Evolution de la superficie du glacier de Lys 58
Figure 44 Evolution de la couverture détritique du glacier de Lavacciu entre 1988 et 2012 59
Figure 45 Evolution de la superficie du glacier de Lavacciu 60
Figure 46 Evolution de la couverture détritique du glacier de Tribolazione entre 1988 et 2012 61
Figure 47 Evolution de la superficie du glacier de Tribolazione....62
Figure 48 Extension maximale de la couverture détritique du glacier de Grande di Verra en 2012 illustrant la difficulté à déterminer l'altitude maximale de couverture détritique 67
Figure 49 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier d'Estelette 69
Figure 50 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Lex Blanche....70
Figure 51 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier du Miage.70
Figure 52 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Brenva 71
Figure 53 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Rochefort....72
Figure 54 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Triolet72
Figure 55 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Pre de Bar....73
Figure 56 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Valtournanche....73
Figure 57 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Grande di Verra 74
Figure 58 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Piccolo di Verra 74
Figure 59 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Lys 75

Figure 60 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Lavacciu 75
Figure 61 Evolution de la couverture détritique et de la superficie du glacier de Tribolazione.....76

Table des tableaux

Tableau 1 Nature des données utilisées dans l'étude de la couverture détritiuqe de la Vallée d'Aoste 15
Tableau 2 Matrice des confusions de la classification automatique du secteur Valsavarenche-Cogne 2005 23
Tableau 3 Matrice des confusions de la classification supervisée du secteur Valsavarenche-Cogne 2005 24
Tableau 4 Evolution de la couverture détritique des secteurs de la Vallée d'Aoste obtenue par classification supervisée 26
Tableau 5 Origine des données de 2012 utilisée pour chaque glacier 31
Tableau 6 Evolution de la superficie des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012 (en km^2) 33
Tableau 7 Evolution du pourcentage de couverture détritique des 13 glaciers sélectionnés entre 1988 et 2012 35
Tableau 8 Evolution de l'altitude maximale de couverture détritique entre 1988 et 2012 36
Tableau 9 Données de superficie et de couverture détritique pour le glacier d'Estelette 39
Tableau 10 Données de superficie et de couverture détritique pour le glacier de Triolet 41
Tableau 11 Données de superficie et de couverture détritique du glacier du Miage 43
Tableau 12 Données de superficie et de couverture détritique du glacier de Brenva 45
Tableau 13 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Triolet 49
Tableau 14 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Pre de Bar 51
Tableau 15 Données de superficie, voile et couverture détritique du glacier de Valtournanche 53
Tableau 16 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Grande di Verra 55
Tableau 17 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Piccolo di Verra 57
Tableau 18 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Lys 59
Tableau 19 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Lavacciu 61
Tableau 20 Données de superficie et couverture détritique du glacier de Tribolazione 63

Annexes

Annexe 1 Liste des glacier étudiés dans la Vallée d'Aoste, code WGMS, vallée d'appartenance et qualité de la visibilité des images de 1999, 2005 et 2012

Nom du glacier	ID WGMS	Vallée	Année	Visibilité	Remarques
Brenva	IT4L01517011	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Ombre
Pre de Bar	IT4L01517028	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	Neige
Triolet	IT4L01517027	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Gruetta East	IT4L01517025	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Leschaux	IT4L01504230	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Planpincieux	IT4L01517018	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Rochefort	IT4L01517017	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Freney	IT4L01517009	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	
Brouillard	IT4L01517007	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Ombre
Miage	IT4L01517006	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Ombre
Lex Blanche	IT4L01517004	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	
Estellette	IT4L01517003	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	
Seigne	IT4L01517002	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	
Chavannes	IT4L01516031	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige

			2012	N	Neige
Breuil Sett	IT4L01516028	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Breuil Mer.	IT4L01516027	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Arguerey Sett.	IT4L01516025	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Arguerey Mer.	IT4L01516024	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Entreves	IT4L01517012	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Ombre
Toules	IT4L01517???	Monte Bianco	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Ombre
Berio Blanc	IT4L01516???	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Valaisan	IT4L01516021	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Freduaz	IT4L01516020	La Thuile	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Usselettes	IT4L01515???	Valgrisenche	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	M	Neige et image coupée
Chateau Blanc	IT4L01515039	Valgrisenche	1999	B	
			2005	N	Neige
			2012	N	Neige
Torrent	IT4L01514022	Rhemes	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Giasson	IT4L01515012	Valgrisenche	1999	M	
			2005	B	
			2012	N	
Plattes des Chamois	IT4L01515025	Valgrisenche	1999	M	
			2005	M	
			2012	N	
Invergnan	IT4L01515011	Valgrisenche	1999	M	
			2005	B	
			2012	N	
Gliaretta-Vaudet	IT4L01515021	Valgrisenche	1999	M	Différence

					neige/glacier ?
			2005	B	
			2012	N	
Goletta-Rhemes	IT4L01514012	Rhemes	1999	M	Différence neige/glacier ?
			2005	B	
			2012	N	
Soches-Tsanteleina	IT4L01514011	Rhemes	1999	M	Différence neige/glacier ?
			2005	B	
			2012	N	
Fond	IT4L01514010	Rhemes	1999	M	Différence neige/glacier ?
			2005	B	
			2012	N	
Lavassey	IT4L01514008	Rhemes	1999	M	Différence neige/glacier ?
			2005	B	
			2012	N	
Basei	IT4L01514013	Rhemes	1999	M	Neige
			2005	B	
			2012	N	
Vaudala	IT4L01514???	Rhemes	1999	M	Neige
			2005	B	
			2012	N	
Gran Vaudala	IT4L01514006	Rhemes	1999	M	Neige
			2005	B	
			2012	N	
Aouille	IT4L01513015	Valsavarenche	1999	M	Neige
			2005	N	
			2012	N	
Entrelor	IT4L01514002	Rhemes	1999	M	Neige
			2005	B	
			2012	N	
Montandeyne	IT4L01513006	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Tribolazione	IT4L01512022	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Grand Etret	IT4L01513012	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Broglio	IT4L01513011	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Monciair	IT4L01513010	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	

			2012	N	
Moncorve	IT4L01513009	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Noaschetta	IT4L01451025	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Gran Paradiso	IT4L01513008	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Lavacciu	IT4L01513007	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Gay	IT4L01451027	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Grand Croux	IT4L01512021	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Roccia Vivia	IT4L01451033	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Money	IT4L01512020	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Valeille	IT4L01512014	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	
Seigne	IT4L01517002	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	
Pene Blanche	IT4L01512018	Cogne	1999		
			2005		
			2012		
Valletta	IT4L01512017	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	
Tessonet	IT4L01512003	Cogne	1999	M	Qualité image
			2005	B	
			2012	N	
Chateau des Dames	IT4L01522029	Valpelline	1999	B	
			2005	M	Neige
			2012	N	
Mt Blanc du Creton	IT4L01506009	Valtournenche	1999	B	
			2005	M	Neige
			2012	N	
Netscho	IT4L01502005	Lys	1999		
			2005		

			2012		
Indren	IT4L01502003	Lys	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Lys	IT4L01502002	Lys	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Perazzi	IT4L01504007	Ayas	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	
Castore	IT4L01504005	Ayas	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	
Piccolo di Verra	IT4L01504298	Ayas	1999	B	
			2005	B	
			2012	B	
Grande di Verra	IT4L01504004	Ayas	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Valtournanche	IT4L01506024	Valtournenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	M	Neige
Forca	IT4L01506019	Valtournenche	1999	M	Neige
			2005	B	
			2012	B	
Cervino	IT4L01506018	Valtournenche	1999	M	Neige
			2005	B	
			2012	B	
Tyndall	IT4L01506017	Valtournenche	1999		
			2005		
			2012		
Leone	IT4L01506015	Valtournenche	1999		
			2005		
			2012		
Cherillon	IT4L01506014	Valtournenche	1999		
			2005		
			2012		
Mont Tabel	IT4L01506012	Valtournenche	1999		
			2005		
			2012		
Grandes Murailles	IT4L01522027	Valpelline	1999	M	Glace/éboulis
			2005	M	Glace/éboulis
			2012	M	Neige
Tsan	IT4L01522026	Valpelline	1999		
			2005		
			2012		
Mont Braoule	IT4L015220220	Valpelline	1999	B	
			2005	M	Neige

			2012	N	Neige
Col Collon	IT4L01522019	Valpelline	1999	B	
			2005	M	Neige
			2012	N	Neige
Eveque	IT4L01522018	Valpelline	1999	M	Eboulis
			2005	M	Eboulis
			2012	N	Neige
Oren	IT4L0152????	Valpelline	1999	M	Eboulis
			2005	M	Eboulis
			2012	N	Neige
Mont Gele	IT4L01521012	Valpelline	1999	B	
			2005	M	Neige
			2012	N	Neige
Grande Rochere	IT4L01517034	Monte Bianco	1999		
			2005		
			2012		
Dzasset	It4L01513???	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Gran Neyron	IT4L01513005	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Timorion	IT4L01513003	Valsavarenche	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Lauson	IT4L01512027	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Gran Val	IT4L01512026	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Tuf Mer	IT4L01512028	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Rayes Noires	IT4L01512030	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Trajo	IT4L01512031	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Grivola	IT4L01512033	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige
Belleface	IT4L01512034	Cogne	1999	B	
			2005	B	
			2012	N	Neige