

Master of Science in Geography

Cartographie de la diversité géomorphologique Derborence et la vallée de la Lizerne (Valais, Suisse)

Hélène Maret

Sous la direction du Prof. E. Reynard
Expert : Dr C. Lambiel



Remerciements

Au terme de ce travail, je souhaite remercier les personnes qui m'ont entourée :

Mon directeur de mémoire, Emmanuel Reynard, pour son soutien, sa disponibilité et sa générosité dans la transmission du savoir,

Mes collègues et amis étudiants Chrystelle, Gaspard, Gilles, Jonathan, Marco, Mattia, Maxime, Pauline, Prisca et Thierry pour ces années folles et l'entraide et l'amitié dans le travail,

Frédy, Marianne, Jean-François, Huguette, Florine, Rosalie et Laurence pour leur rôle de baby-sitter,

Mes parents pour m'avoir accompagnée à pied ou en planeur sur le terrain, ainsi que ma sœur Florine et son fidèle œil de photographe

Et surtout mon mari Lucien et mon fils Léon pour leur amour au quotidien.

Structure du travail

Ce mémoire est constitué de trois articles scientifiques qui peuvent être séparés. Dans ce document, une partie introductive présentant la problématique générale du travail précède ces articles et un chapitre de conclusion suit. La bibliographie est globale pour l'ensemble du travail et les trois articles.

Le premier article sera publié dans une version plus courte dans le *Bulletin de la Murithienne* numéro 131 en automne 2015.

Note : sauf indication contraire, toutes les figures et photographies sont de l'auteur.

Résumé

Alors que le concept de biodiversité est aujourd'hui entré dans le langage courant et très fréquemment utilisé pour des études analytiques, la diversité du monde abiotique est encore très peu reconnue. Ce mémoire a pour objectif le développement et le test d'une méthode de transformation des cartes géomorphologiques selon la légende de l'Université de Lausanne en cartes de la diversité géomorphologique. La région de Derborence, dans les Alpes valaisannes, a été choisie comme site d'étude. Ce travail est composé de trois articles : le premier présente une analyse complète de la géomorphologie de la région de Derborence – Vallée de la Lizerne, sur la base de la carte géomorphologique ; le second analyse des méthodes de cartographie de la géodiversité existantes et expose la méthode développée ; le résultat du travail fait l'objet du dernier article, à savoir la carte de la diversité géomorphologique, accompagné d'une analyse comparée avec le terrain.

Mots-clés : Géomorphologie, cartographie, géodiversité, Derborence

Abstract

When the biodiversity concept is nowadays often used in the everyday language and for analytic studies, the geodiversity is still not well recognized. The aim of this master thesis is to assess geomorphological diversity based on a geomorphological map. A method was developed to transform the latter into a map of geomorphological diversity. In other words, a qualitative geomorphological map (morphogenetic map) was transformed into a quantitative map (including the value of a geomorphological diversity index). The study area is the Lizerne valley, including Derborence (Valais, Switzerland). This work is divided into three articles: The first presents a global analysis of the geomorphology of the Derborence – Lizerne valley area, based on the geomorphological map; the second one analyses methods proposed in some papers and outlines the method developed for this work; the last one shows the result of the work i.e. the geomorphological diversity map.

Keywords: Geomorphology, mapping, geodiversity, Derborence

Table des matières

1. Introduction	1
2. Etat de la recherche	3
La géodiversité, un concept théorique.....	3
La géodiversité appliquée.....	6
L'évaluation de la géodiversité	7
3. Problématique	11
Objectif général	11
Sous-objectifs	12
Apports de l'étude.....	12
4. Méthodes	13
5. Terrain d'étude	14
6. Article I – Géomorphologie de la région de Derborence.....	17
7. Article II – Cartographie de la diversité abiotique	40
8. Article III – Diversité géomorphologique : étude de cas	61
9. Conclusion générale.....	85
Synthèse.....	85
Limites	86
Perspectives	87
10. Bibliographie	89
11. Annexes.....	98
Carte géomorphologique	
Carte des polygones	
Carte de la diversité géomorphologique	

1. Introduction

Que serait la Terre sans montagnes, sans rivières, sans diversité aucune ? Une sphère parfaitement lisse n'aurait jamais pu accueillir la vie telle que nous la connaissons, la diversité « morphologique » de notre globe est effectivement la base du monde vivant (Parks et Mulligan, 2010). Ces dernières années ont vu naître un nouvel intérêt pour l'environnement et sa protection. Le terme de « biodiversité » est aujourd'hui largement répandu et son intérêt reconnu par un grand nombre de personnes et de pays jusque dans leur législation. Le sommet de la Terre de Rio en 1992 a pour cela constitué une étape importante pour la reconnaissance internationale de la nécessité de protéger la nature. Si de nombreux travaux ont été entrepris dans les domaines de la biodiversité, le monde abiotique est, quant à lui, très peu pris en compte. Les menaces ne sont pourtant pas moins importantes et les conséquences de l'exploitation humaine souvent irrémédiables (Gordon et Barron, 2012 : 289).

En effet, le monde abiotique présente des valeurs dignes de protection. De nombreux travaux ont d'ailleurs été entrepris dans le domaine de la géoconservation¹ (Gray, 2005 ; Burek et Prosser, 2008 ; Carcavilla *et al.*, 2009), à travers, notamment, le concept de géosites ou géomorphosites² (Reynard, Coratza et Regolini-Bissig, 2009). La valeur des géosites peut être séparée en une valeur scientifique par l'exemplarité d'un site et son importance pour reconstituer l'histoire de la Terre, par exemple, et un certain nombre de valeurs additionnelles, notamment esthétique, économique, culturelle ou écologique (Reynard *et al.*, 2007 ; Reynard, 2009 : 11). Qu'en est-il alors de la diversité du monde abiotique ? Celle-ci peut être considérée comme une valeur ou, au minimum, une caractéristique de la nature. Cet aspect est aujourd'hui généralement reconnu sous le nom de géodiversité (Gray, 2004 ; Zwolinski, 2004).

La géodiversité est la variété naturelle des éléments géologiques, géomorphologiques et pédologiques. Cela inclut leurs assemblage, relations, propriétés, interprétations et systèmes (Gray, 2004 : 6, propre traduction). Dans une acceptation plus large, les

¹ La géoconservation est la protection du géopatrimoine (O'Halloran, 1994).

² Les géosites sont des portions de la géosphère présentant une importance particulière pour la compréhension de l'histoire de la Terre (Reynard, 2004). Les géomorphosites sont un type de géosites (Reynard, 2009).

éléments de l'hydrosphère (rivières, lacs, mers et océans) sont également considérés comme faisant partie de la géodiversité. Certains auteurs y ajoutent également les activités humaines. D'autre part, la géodiversité peut être estimée comme l'égal de la biodiversité (Gray, 2008 : 287) ou comme sa base (Pellitero *et al.*, 2010 ; Gordon et Barron, 2012 : 285), le monde abiotique étant indispensable au monde vivant (Serrano et Ruiz Flaño, 2007b ; Brazier *et al.*, 2012).

Au-delà de ces aspects théoriques, la géodiversité a également un important caractère appliqué (Serrano *et al.*, 2009). Par son évaluation et sa cartographie, elle peut être utilisée comme outil pour la prise de décision et la gestion de la nature, notamment dans les parcs naturels pour identifier les aires de priorité pour la conservation, la gestion et l'utilisation des ressources naturelles (Pellitero *et al.*, 2010, Erikstad, 2012). D'autre part, cette notion est apparue dans un certain nombre de législations touchant à la protection de la nature, notamment par l'adoption de la Charte sur le patrimoine naturel en Australie, initiatrice du terme de géodiversité (voir Dixon, 1995 ; Sharples, 1995 ; Pemberton, 2000). En Europe, le « manifeste européen sur le patrimoine terrestre et la géodiversité » constitue une base de travail (European Manifesto on Earth Heritage and Geodiversity, 2004) et la géodiversité est également incluse dans des stratégies territoriales en Grande-Bretagne (Stanley, 2001 ; Burek et Potter, 2006) ou en Espagne (Carcavilla *et al.*, 2009). Plusieurs auteurs ont d'autre part relevé l'importance d'introduire la géodiversité dans les politiques environnementales (Gordon *et al.*, 2011 ; Gordon et Barron, 2012). En Suisse, un outil d'évaluation du paysage a été développé pour la création de parcs d'importance nationale. Il y est demandé de procéder à un inventaire des formes géologiques et géomorphologiques remarquables et la diversité des formes est considérée comme une valeur (Stuber, 2008 : 15). On peut considérer cette pratique comme une forme de mesure de la géodiversité bien que le document ne le mentionne pas directement.

On observe donc un intérêt croissant pour la valorisation du monde abiotique ; sa fragilité est aujourd'hui reconnue (Sharples, 1995 ; Hjort et Luoto, 2010 ; Gordon et Barron, 2012 : 289) et des efforts sont entrepris pour évaluer la géodiversité (Serrano et Ruiz-Flaño, 2007a ; Ruban, 2010 ; Gordon et Barron, 2012). Dans ce cadre, la géodiversité paraît un concept intéressant pour améliorer les connaissances et utile pour la gestion de l'environnement. Le travail présenté ici a pour but d'évaluer la diversité géomorphologique d'une portion de territoire et de développer une méthode de conversion de cartes

géomorphologiques en cartes de la diversité géomorphologique. En raison du fort ancrage spatial de la géodiversité (Pellitero *et al.*, 2010 : 163), la cartographie paraît effectivement le meilleur moyen de communication (Pereira *et al.*, 2010).

2. État de la recherche

Les travaux traitant de la géodiversité ne sont pas nombreux. Divers articles ont été publiés tentant de définir cette notion et quelques travaux d'application ont également été entrepris. Dans le cadre de ce travail, les travaux les plus intéressants sont ceux qui ont permis la mise en place de systèmes d'évaluation et de cartographie de la géodiversité. À travers cette revue de la littérature, la grande diversité des travaux, mais également la faiblesse du concept de géodiversité seront démontrées.

LA GEODIVERSITE, UN CONCEPT THEORIQUE : TRAVAUX DE DEFINITION

La géodiversité est un terme né à la fin des années 1990, par analogie à celui de biodiversité (Sharples, 1995 ; Gray, 2008). Très lié aux concepts de patrimoine géologique (geohéritage ; Pemberton, 2000 ; Panizza et Piacente, 2009 ; Erikstad, 2012) et de géoconservation (Burek et Prosser, 2008 ; Gray, 2008), il est souvent considéré comme un outil de gestion pour les parcs naturels. « *The maintenance or conservation of the diversity of the earth's physical features and processes (« geodiversity ») is the basic goal of « geoconservation »* » (Sharples, 1995 : 37). Ce terme est ainsi perçu, en premier lieu, comme un moyen d'application pour la gestion de la nature et la géoconservation. Partant de cette définition, de nombreux travaux ont limité la géodiversité à la diversité des éléments à forte valeur³ (géosites, géomorphosites, paysages) qui sont donc dignes de protection. Il paraît pourtant réducteur de limiter la diversité abiotique à ces seuls éléments. Effectivement, la géodiversité peut également être considérée comme la variété d'éléments du monde abiotique sans considérer leur valeur (Pereira *et al.*, 2012 a ; Pellitero *et al.*, 2014).

³ On entend ici la valeur attribuée à des éléments dans un sens de patrimoine.

La géodiversité a tout d'abord été perçue, d'un point de vue théorique, comme synonyme de diversité abiotique, en opposition à la biodiversité (Gray, 2008 : 287). La biodiversité faisant référence aux éléments du monde vivant, la géodiversité permet ainsi de faire appel aux éléments abiotiques, sous-entendu la variété des conditions déterminant l'écosystème. Cette notion est très proche de celle d'habitat en biologie.

D'abord considéré comme la diversité géologique (Dixon, 1995 ; Nieto, 2001), le terme a pris ensuite une définition plus large, notamment avec l'ouvrage de référence de Gray (2004) : « *Geodiversity : the natural range (diversity) of geological (rocks, minerals, fossils), geomorphological (landform, processes) and soils features. It includes their assemblages, relationships, properties, interpretations and systems* » (Gray, 2004 : 6). La notion a encore été étendue, considérant la richesse du monde abiotique dans son ensemble, en y incluant le monde aquatique : « *The variability of abiotic nature, including lithological, tectonic, geomorphological, soil, hydrological, topographical elements and physical processes on the land surface and in the seas and oceans, together with systems generated by natural, endogenous and exogenous and human processes, which cover the diversity of particles, elements and sites* » (Serrano et Ruiz Flaño, 2007b : 144). Cette définition a été reprise par Kozłowski, qui y ajoute encore les impacts de l'activité humaine (Kozłowski, 2004). Selon ces différentes définitions, la biodiversité et la géodiversité constituent la diversité naturelle (Serrano, 2002). Mais pour certains auteurs, la géodiversité est plus que simplement l'équivalence de la biodiversité : « *It should be clear that it is more than a complement of biodiversity, but a fundamental part of natural diversity* » (Serrano et Ruiz Flaño, 2007a : 142).

Ces définitions s'éloignent ici de l'aspect de patrimoine et de conservation de la nature en considérant simplement la diversité des éléments abiotiques sans prendre en compte leur valeur propre. Le tableau 1 résume tous les éléments pouvant être pris en compte pour définir la diversité du monde abiotique⁴.

⁴ Dans ce travail, le terme de « diversité abiotique » selon Duff, 1994 (repris par Nastase *et al.*, 2012 ; Serrano *et al.*, 2009 et Pellitero *et al.* 2011) a été choisi pour éviter l'usage abusif du terme « géodiversité » pour des études n'évaluant qu'une petite partie de la géodiversité dans son ensemble. Cela permet également de ne pas confondre diversité géologique et géodiversité globale.

Tableau 1 : Les éléments de la diversité abiotique sur Terre.

Topographie	Énergie	
	Rugosité	
Géologie	Matériel terrestre	Minéraux
		Lithologie
		Dépôts superficiels
		Fossiles
	Tectonique	
Structure		
Géomorphologie	Morphostructures	
	Systèmes morphogénétiques	
	Processus	
	Formes d'érosion	
	Formes d'accumulation	
	Micro-formes	
Hydrologie	État de l'eau (eau, neige, glace, glacier)	
	Éléments hydrologiques : Océans, mers, lacs, rivières, marais, chutes	
Sols	Ordres	
	Sous-ordres	

Traduit de Serrano et Ruiz Flaño, 2007 et 2009

En plus de ces éléments, la géodiversité possède, d'autre part, une forte composante territoriale, mais également temporelle. Les éléments abiotiques se caractérisent effectivement par leur localisation dans l'espace et leur aspect dynamique (Pellitero *et al.*, 2010).

Par ailleurs, de nombreuses critiques sont apparues dans la littérature scientifique. Le fait que la diversité soit une valeur peut être remis en cause : par exemple, une zone entièrement plate comme un désert n'a pas forcément moins de valeur qu'un paysage très diversifié. L'importance d'un site n'est pas toujours liée à sa diversité, mais aussi, par exemple, à son uniformité ou sa continuité (Joyce, 1997). Par souci d'objectivité, la diversité devrait simplement être considérée comme une caractéristique d'un territoire donné, mais le fait de le qualifier de diversifié (faiblement, fortement, etc.) participe à sa valorisation.

La diversité des définitions de la géodiversité a été exprimée par Panizza (2009) : selon cet auteur, il est possible de distinguer la géodiversité

- extrinsèque ou intrinsèque pour exprimer si l'on fait état de la diversité en comparaison à d'autres sites ou sur la base du site d'étude ;

- simple ou large selon que l'on se réfère à la variété totale des objets géologiques ou à des géosystèmes particuliers qui sont divers en eux-mêmes (en référence à Zwolinski, 2010) ;
- globale, régionale ou locale selon l'échelle de référence ;
- avec un critère subjectif, basé sur des objets spécifiques.

On observe donc que la géodiversité, au sens théorique, est un concept encore flou. Malgré de nombreuses tentatives de définition, aucun consensus ne paraît avoir été encore trouvé au sein du monde scientifique.

LA GEODIVERSITE APPLIQUEE

Le concept de géodiversité a été appliqué dans de nombreux domaines. Plusieurs travaux ont été menés en lien avec la biodiversité. Certains auteurs considèrent par exemple la géodiversité comme un potentiel de ressources pour le monde biotique (Parks et Mulligan, 2010) ou comme aide à la conservation de la biodiversité (Brazier *et al.*, 2012). D'autres travaux ont pour but de créer des indicateurs de géodiversité pour les études de biodiversité (Xavier-da-Silva et Mendes de Carvalho-Filho, 2004) ou de comparer la géodiversité à la biodiversité (Jonasson *et al.*, 2005).

La géodiversité est souvent utilisée comme outil de planification et d'aide à la décision et à la gestion dans les parcs naturels ou géoparcs. C'est notamment le cas en Espagne dans le Parc naturel des Gorges du Haut Ebre et Rudron (Pellitero *et al.*, 2010), en Pologne dans le parc national des Tatras (Zwoliński et Stachowiak, 2012), en Roumanie (Comănescu et Nedelea, 2012 ; Năstase *et al.*, 2012) ou encore dans les Dolomites, site inscrit au Patrimoine mondial de l'UNESCO (Panizza, 2011).

Dans le cadre d'évaluations du patrimoine, la géodiversité est parfois considérée comme synonyme ou du moins une composante principale du géopatrimoine (Pemberton 2000, Panizza 2009 ; Bruschi, Cendrero et Albertos, 2011 ; Panizza, 2011 ; Seijmonsbergen *et al.*, 2014). Plusieurs évaluations de la géodiversité se basent ainsi uniquement sur la richesse des géo(morpho)sites (Alexandrowicz et Kozlowski, 1999 ; Panizza, 2009 ; Ruban, 2010). Cette pratique n'est pas approuvée par plusieurs auteurs mais présente un certain intérêt dans le cadre de l'évaluation de géomorphosites. Pereira *et al.* (2012 a) précisent que « *Whereas geodiversity refers to all abiotic variety of nature, geological*

heritage is the set of the most relevant geodiversity elements with particular importance for science, education or tourism » (*ibid.* : 107). Le géopatrimoine ne doit donc pas être considéré comme synonyme de la géodiversité. « *Such methodologies are not acceptable from the theoretical point of view* » (Pellitero *et al.*, 2014 : 4).

Au vu du nombre d'éléments pouvant être inclus dans le monde abiotique (cf. tableau 1), plusieurs travaux se sont concentrés sur certains éléments uniquement. Saldaña et Ibañez (2004) ont calculé la diversité pédologique. Nieto (2001) a limité son étude à la diversité géologique. Plusieurs travaux, basés sur l'indice développé par Serrano et Ruiz Flaño (2007b), prennent en compte la diversité géologique, géomorphologique, hydrologique et pédologique, mais certains éléments sont souvent mis de côté par souci de simplification.

Les chercheurs impliqués dans des études sur la géodiversité sont espagnols (Serrano, Ruiz Flaño, Pellitero, Carcavilla) ; australiens (Sharples, Pemberton), anglais (Gray, Gordon), italiens (Panizza, Piacente), polonais (Zwolinski, Stachowiak, Jaskulska), finlandais (Hjort, Luoto), portugais (Pereira, Santos, Silva, Xavier-da-Silva), roumains (Năstase, Comănescu, Nedelea) ou hollandais (Seijmonsbergen, De Jong, de Graaff, Anders). Des études ont ainsi été menées en Espagne, Portugal, Roumanie, Pologne, Tasmanie, Italie (Dolomites), Autriche, Liechtenstein, au nord de la Finlande et au Brésil et ont pour la plupart porté sur de grands territoires (plus de 300 km²). En Suisse, seule une étude préliminaire sur deux sites (Jaskulska *et al.*, 2013) a été menée à ce jour. Les travaux menés dans les Alpes sont d'ailleurs très rares (en Italie dans les Dolomites ; Panizza, 2011, et entre l'Autriche et le Liechtenstein ; Seijmonsbergen *et al.*, 2014).

EVALUATION DE LA GEODIVERSITE

De nombreuses méthodes de calcul ont été développées pour l'évaluation de la géodiversité. Ce chapitre présente plusieurs points sur lesquels les méthodes diffèrent et se distinguent. La première étape pour l'évaluation de la géodiversité est le choix des éléments à prendre en compte. Certaines évaluations se basent sur des classifications d'éléments participant à la géodiversité alors que d'autres utilisent des éléments influençant la diversité (méthode directe ou indirecte). La deuxième étape est la formule de calcul de la géodiversité : des exemples d'indices de la géodiversité s'inspirant des formules de richesse spécifique et des indices de diversité de Shannon et Simpson seront

présentés. Pour terminer, la question de la représentation est importante. Du point de vue de l'échelle d'analyse, il est possible de travailler avec des unités de paysage ou des mailles. La représentation des résultats sera abordée plus loin.

En se référant aux mesures de la biodiversité, une étape indispensable et fondamentale est la classification des éléments à mesurer. En biologie, cette classification se fait hiérarchiquement (famille, genre, espèce, etc.). Pour le monde abiotique, ce travail n'a pas été mené aussi loin et il n'est pas certain qu'il soit possible de le faire. Une forme de classification est celle fournie par Serrano et Ruiz Flaño (2007b) (cf. tableau 1), qui se base sur les processus de formation. Hjort et Luoto (2010) se sont inspirés de ce tableau pour classer les éléments géomorphologiques selon leur date de formation afin de déterminer une variabilité temporelle. Une autre façon de classer les éléments est celle proposée par Pellitero (2013). Le monde abiotique étant fortement lié à l'espace, l'échelle d'étude est très importante ; l'auteur a ainsi créé une hiérarchie scalaire. Ce type de classification a également été utilisé par Zwolinski (2010) ; dans cette étude, la classification est basée sur les formes, passant des zones morphoclimatiques (chaîne de montagnes par exemple) aux formes isolées (talus) (Zwolinski, 2010 : 78)

Ces méthodes de classification peuvent être caractérisées de « directes » par opposition aux méthodes indirectes (Pellitero *et al.*, 2014). Ces dernières utilisent des indicateurs sous-jacents qui ne sont pas des attributs de la géodiversité mais qui y contribuent ; ce sont généralement des éléments morphométriques (voir Hjort et Luoto, 2010 et 2012 ; Zwolinski, 2010 ; Zwolinski et Stachowiak, 2012). Ces éléments sont par exemple la rugosité ou la fragmentation du relief. L'utilisation de ces indicateurs est intéressante car elle permet un travail plus rapide ; effectivement, le comptage des formes géologiques et ou géomorphologiques est bien plus fastidieux que le calcul de données de terrain pouvant facilement être fournies par des modèles numériques de terrain. Par contre, cette pratique peut présenter des inconvénients. Avant tout, il faut que l'utilisation de ces indicateurs soit basée sur une hypothèse fiable, par exemple le fait que la rugosité induirait une plus grande diversité. D'autre part, le problème des études basées sur ce genre d'indicateurs est que les conclusions sont parfois très simplistes, par exemple que les régions montagneuses, les crêtes ou les rivières présentent une plus grande diversité.

Hjort et Luoto (2012) ont comparé des méthodes directes et indirectes de calcul de la géodiversité. Ils ont utilisé les variables prédictives de pente, altitude, indice

topographique et radiation solaire à partir de MNT et d'humidité, verdure, luminosité et de végétation à partir de données de télédétection. Il en est ressorti que les MNT prédisent mieux la géodiversité que la télédétection. De plus, il semblerait que l'aspect de la pente soit le plus déterminant. A propos des méthodes indirectes utilisant les indicateurs topographiques : [...] *Topographical variables are considered to be rather good predictors of geodiversity if the classification of the specific features of geodiversity is not excessively detailed* (Hjort et Luoto, 2012 : 79). L'utilisation d'indicateurs topographiques tels que la fragmentation, l'énergie ou la préservation paraît donc justifiée mais il semblerait qu'ils soient très sensibles à la classification préalable. L'inconvénient de ces indicateurs est également qu'ils ne donnent aucune indication sur la genèse et les processus menant à la morphologie du terrain.

Partant des travaux entrepris pour l'étude de la biodiversité, il existe plusieurs types de formules pour le calcul de la diversité d'une communauté. La richesse spécifique mesure simplement le nombre d'espèces présentes par unité de surface. Une autre façon plus élaborée de calculer la diversité, sur la base des indices de Shannon (1948) ou de Simpson (1949) est d'ajouter la fréquence relative de chaque espèce à la mesure la richesse spécifique. Un dernier indice qui n'a encore jamais été appliqué à la géodiversité est l'équitabilité. Ce dernier indice mesure la distribution des fréquences : le rapport entre diversité observée et diversité maximale possible ; celui-ci ne paraît pas applicable au monde abiotique. Il faut encore ajouter que la diversité peut être considérée comme diversité au sein d'un milieu, entre milieux ou la diversité totale (la somme des deux précédents).

Les études de géodiversité basées sur la richesse spécifique sont nombreuses. L'indice le plus généralement utilisé, développé par Serrano et Ruiz Flaño (2007b) est un indice de richesse par unité de surface (il divise le nombre d'éléments par la surface considérée). Cet indice concilie méthodes directes et indirectes car il ajoute un indicateur morphométrique (la rugosité). L'indice (Gd) met en rapport la variété d'éléments physiques (Eg) et la rugosité (R) avec la surface considérée (S).

$$Gd = Eg R / \ln S$$

Les éléments physiques (Eg) sont la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie et les sols. La topographie et le climat sont représentés par l'indice de rugosité. Cet indice a été

appliqué et parfois modifié dans un grand nombre d'étude (Serrano et Ruiz Flaño, 2007a ; Hjort et Luoto, 2010 ; Pellitero *et al.*, 2010 ; Năstase *et al.*, 2012).

Quelques études ont d'autre part utilisé les indices de diversité de Shannon et/ou de Simpson (Benito-Calvo *et al.*, 2009 ; Saldaña et Ibáñez, 2004) et d'autres travaux ont utilisé des classifications subjectives. Dans ce cas, des valeurs pondérées sont attribuées aux différents éléments. Par exemple Zwolinski estime que les fluviosols ont une faible géodiversité alors que les cambiosols présentent une très haute géodiversité. Plusieurs études ont proposé de telles valeurs (Panizza, 2009 ; Zwolinski et Stachowiak, 2012). Cela paraît assez arbitraire d'attribuer de telles valeurs. Il est important de baser ces valeurs sur des calculs avérés. Pellitero critique ainsi cet usage : « *in our opinion geodiversity evaluates variety, not quality, which is already assessed in geoheritage calculations* » (Pellitero *et al.*, 2014).

Un autre élément sur lequel les différentes méthodes d'évaluation se distinguent est l'unité d'analyse. Certaines méthodes se basent sur des unités représentées par des éléments de l'espace, par exemple des éléments géomorphologiques (Serrano et Ruiz Flaño, 2007a ; Năstase *et al.*, 2012 ; Serrano *et al.*, 2009), les géomorphosites (Panizza, 2009 ; Panizza et Piacente, 2009), les zones d'habitat (écosystème) (Pellitero *et al.*, 2010) ou les unités administratives (Comănescu et Nedela, 2012). Mais il est également possible de mesurer la géodiversité de façon systématique, en utilisant une grille, ce qui implique la définition d'une taille de maille (Hjort et Luoto, 2010 ; Pereira *et al.*, 2012 ; Zwolinski et Stachowiak, 2012).

La géodiversité a, comme précisé plus haut, une forte composante spatiale. Pour cette raison, la cartographie est largement répandue dans les travaux sur la géodiversité. Plusieurs études se basent sur une carte géomorphologique (Serrano et Ruiz Flaño 2007 ; Serrano, Ruiz Flaño et Arroyo, 2009 ; Pellitero *et al.*, 2010 ; Zwolinski, 2010 ; Năstase *et al.*, 2012 ; Pereira *et al.*, 2012a), géologique (Comănescu et Nedela, 2012 ; Năstase, *et al.*, 2012 ; Pereira, *et al.*, 2012a), d'habitat ou d'utilisation du sol (Pellitero, *et al.*, 2010, Zwolinski, 2010) ou encore géotouristique (Comănescu et Nedela, 2012).

Ce travail a pour but de créer une carte de la géodiversité sur la base d'une carte géomorphologique. Serrano, Ruiz Flaño et Arroyo (2009) ont déjà transformé une carte géomorphologique détaillée en carte d'unités géomorphologiques, leur indice se basant

ensuite justement sur ces unités. Cette méthode ne nécessite pas de passer de la carte vecteur à la carte raster mais elle n'est pas aussi convaincante qu'une méthode basée sur un quadrillage. Dans le cadre de cette étude, la carte géomorphologique, au format vecteur, sera transformée en carte raster afin de l'analyser en termes de diversité géomorphologique à l'aide d'une grille.

3. Problématique

L'Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne a mené de nombreux travaux sur la cartographie géomorphologique (Schoeneich, 1993a,b ; Schoeneich, Reynard et Pierrehumbert, 1998) et sur l'évaluation de géomorphosites (par ex. Reynard *et al.*, 2007 ; Maillard et Reynard, 2011 ; Perret et Reynard, 2011), dont plusieurs mémoires de master (Kozlik, 2006 ; Genoud, 2008 ; Perret, 2008 ; Maillard, 2009). Par contre, la géodiversité n'a encore jamais fait l'objet de recherches au sein de l'institut, à l'exception d'une étude exploratoire sur la géodiversité des sites de Derborence et de l'Illgraben (Jaskulska, *et al.*, 2013). Au vu des nombreux travaux d'inventaires et évaluations de géomorphosites entrepris, l'idée d'ouvrir un nouveau champ de recherche dans le domaine de la diversité géomorphologique est pensée en terme de diversité intrinsèque d'un territoire. Comme précisé plus haut, de nombreux travaux considèrent la géodiversité comme étant un indicateur qualitatif. Cette étude est quant à elle plutôt orientée vers la variété des éléments d'un territoire, ce que l'on peut qualifier de diversité intrinsèque.

OBJECTIF GENERAL

L'ambition de cette étude est de mesurer la diversité abiotique, plus précisément la diversité géomorphologique d'un territoire donné. L'objet du travail étant le passage de la cartographie géomorphologique à une cartographie de la diversité à l'aide d'un indice de calcul. Pour mener une étude complète sur la géodiversité, il faudrait évidemment prendre en compte la diversité de l'ensemble du monde abiotique et ajouter les aspects de la géologie, pédologie et de l'hydrologie. S'agissant d'un mémoire de master, le travail se concentrera uniquement sur la géomorphologie.

SOUS-OBJECTIFS

L'étude est divisée en trois sous-objectifs ou axes de recherche : 1) La cartographie géomorphologique ; 2) La mise au point d'une méthodologie pour mesurer la diversité géomorphologique et passer de la cartographie géomorphologique à la cartographie de la diversité géomorphologique ; 3) La création d'un indice de diversité géomorphologique et la cartographie de cet indice.

APPORTS DE L'ETUDE

En Suisse, aucune étude n'a encore été menée sur la géodiversité. Dans les Alpes, les seuls travaux menés concernaient la « géomorphodiversité », dans un sens de diversité des géomorphosites (Panizza, 2009) ou le « potentiel de géoconservation » (Seijmonsbergen *et al.*, 2014). Cette étude sera donc la première étude de diversité géomorphologique en Suisse. Elle se veut novatrice car appliquée à une échelle locale, la plupart des études de géodiversité ayant été menées à une échelle régionale ou nationale. L'évaluation de la diversité géomorphologique se fera d'un point de vue quantitatif plutôt que qualitatif, et comme l'évaluation de géomorphosites est déjà bien développée en Suisse, ce n'est pas l'objet de la diversité géomorphologique comme considérée dans cette étude. D'autre part, les dernières techniques de cartographie et d'analyse spatiale développées récemment seront utilisées. Bien que limitée à la géomorphologie, la méthode développée sera applicable à d'autres éléments, à travers, par exemple, les cartes géologiques ou d'occupation du sol. Cette méthode sera ainsi une base à appliquer à tous les éléments constituant potentiellement la géodiversité.

4. Méthodes

La première étape du travail consiste en la cartographie géomorphologique. Pour cela, des cartes existantes au format papier, dessinées au crayon de couleur doivent être numérisées et localisées spatialement à l'aide du logiciel ArcGIS. Le travail de cartographie géomorphologique se fait sur la base des cartes de swisstopo (Cartes nationales au 25'000, 10'000, cartes historiques Siegfried et Dufour) ; des modèles numériques de terrain (MNT25 et SwissAlti^{3d}) et des orthophotos. Avec le logiciel ArcGIS, les modèles numériques de terrain (MNT) peuvent être transformés à l'aide de l'extension « *analyse spatiale* » (*Spatial Analyst*) pour en faire des cartes d'ombrage, de pente, d'exposition (*hillshade, slope, aspect*) qui aident à la compréhension des formes. Ces outils permettent également de produire des statistiques. La carte est produite sur la base des travaux de l'Université de Lausanne et de sa cartographie pour Illustrator (Schoeneich *et al.*, 1998) et pour ArcGIS (Maillard *et al.*, 2011 ; Lambiel *et al.*, 2015). Cette cartographie comporte des éléments sous forme de points, lignes ou surfaces. Les couleurs des surfaces représentent les processus dominants (glaciaire, périglaciaire, fluviatile, gravitaire, etc.) dans les zones d'accumulation. Dans les zones d'érosion, les formes sont dessinées sur fond blanc.

La deuxième étape consiste en la transformation de cette première carte géomorphologique en carte d'éléments surfaciques uniquement. Les éléments ponctuels et linéaires doivent ainsi être modifiés. Cela est rendu possible à l'aide de l'outil « zone tampon » (*buffer*) disponible dans l'extension « *analyse spatiale* » (*Spatial Analyst*). L'enjeu de cette étape est le choix de la taille de chaque élément afin qu'il corresponde au plus près à la réalité.

Cette seconde carte terminée, elle doit être transformée en carte raster avec un maillage fin pour ne pas perdre d'informations. C'est cette dernière image qui est ensuite utilisée pour l'analyse de diversité, il est donc important que les données soient classées à l'aide de l'identifiant correspondant à leur description et non pas avec leur identifiant propre. Cette étape se fait à l'aide de l'outil de conversion « entité vers raster » (*feature to raster*).

L'étape finale consiste à créer la carte de diversité géomorphologique. Dans l'extension « *analyse spatiale* » (*Spatial Analyst*), le filtre de *statistique par bloc* (*block statistics*) dans

le jeu d'outils *voisinage* permet d'agréger les données par cellules. Le nombre de valeurs uniques dans le voisinage est ensuite attribué à l'ensemble de la cellule. Tout l'enjeu de cette étape réside dans le choix de la taille de maille. Effectivement, la carte de diversité géomorphologique doit être suffisamment simple pour pouvoir être utilisée dans le cadre du géotourisme, par exemple, et devrait être facilement adaptée à l'ajout d'autres éléments que la géomorphologie (géologie, hydrologie, pédologie, etc.).

5. Terrain d'étude

Cette étude a été menée dans la région de Derborence – Vallée de la Lizerne, dans le canton du Valais (Suisse). La surface d'étude est d'environ 53 km².

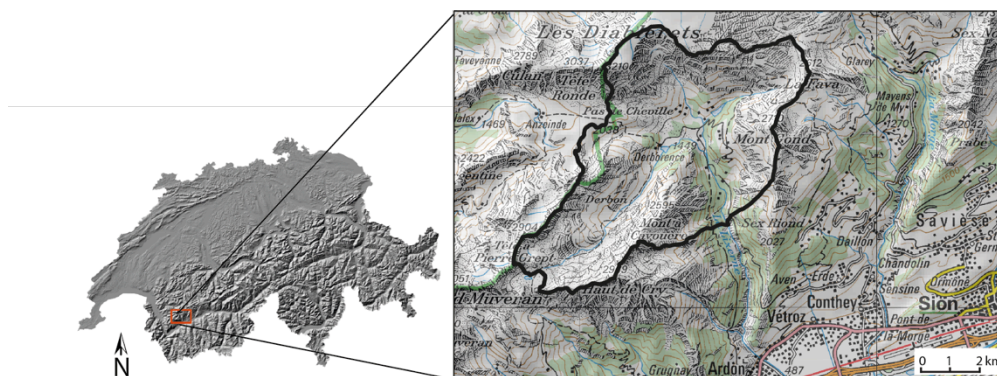


Figure 1 : Localisation du terrain d'étude

Le terrain d'étude comprend pratiquement l'ensemble du bassin versant de la Lizerne (il manque une partie au Sud), un affluent du Rhône se situant à environ 100 kilomètres de sa source. Il est délimité au Nord par le massif des Diablerets (NE) et le lapiaz de Tsanfleuron (N-NE), à l'Est par le massif du Mont Gond et de la Fava qui le sépare de la vallée de la Morge, à l'Ouest par le Pas de Cheville et l'arête le reliant au Grand Muveran et enfin, au Sud, la limite suit la crête jusqu'au Haut de Cry et rejoint le Mont Gond en traversant la vallée de la Lizerne à la hauteur de Tsamperon.

La Lizerne prend sa source dans le vallon rejoignant les lapiés de Mié, à l'Est. Elle est rejointe par les eaux du torrent du Pessot à la hauteur de Godey (depuis le Nord), puis par les eaux de la Chevillence (de l'Ouest) et de la Derbonne (du Sud-Ouest) à leur sortie du lac de Derborence. Le cirque de Derborence (1462 m) est surmonté de hautes parois dont le sommet des Diablerets (3210 m). Deux écroulements meurtriers se sont déclenchés dans ces parois (en 1714 et 1749). Le lac de Derborence s'est formé à la suite de ces

événements qui ont coupé le vallon et l'écoulement de la Derbonne. Derborence est un site naturel protégé depuis 1961 (« Derborence (Valais) », 2013).

D'un point de vue géomorphologique, les processus principaux de la région sont gravitaires, fluviaux, karstiques et glaciaires, avec de grandes surfaces d'accumulations gravitaires, de nombreux lapiés, plusieurs formes morainiques et de nombreux torrents.

Le site a connu une forte activité géomorphologique, principalement sous l'effet des processus glaciaires et des écroulements, relayés par les activités fluviales. Les paysages sont en mutation ; le retrait des glaciers met à jour des surfaces glacio-karstiques et les karsts déjà dénudés se transforment lentement. Le lac de Derborence se remplit petit à petit et sa taille s'amenuise lentement. D'autre part, les activités humaines ont également eu un impact sur ces paysages, avec la construction de routes et de digues.

La région est plus largement décrite, avec notamment des informations quant à la tectonique, la géologie et la géomorphologie, dans le premier article de ce travail.

Géomorphologie de la région de Derborence

Hélène Maret et Emmanuel Reynard

Institut de géographie et durabilité,
Université de Lausanne, Géopolis, CH-1015 Lausanne
helene.maret@unil.ch, emmanuel.reynard@unil.ch

Résumé

La région de Derborence est bien connue pour sa richesse et sa diversité biologique. Ces dernières s'inscrivent dans un contexte géomorphologique particulier, qui est tout aussi riche et diversifié. Ce travail décrit et retrace la genèse des formes visibles sur le terrain. Il est accompagné d'une carte géomorphologique.

Abstract

The biological richness and diversity of the Derborence Region is well-known and this is linked to a particular geomorphological context that is also very rich and diverse. This paper describes and relates the genesis of the visible landforms, on the basis of a geomorphological map.

INTRODUCTION

Dans le cadre d'un mémoire de master (Maret, 2015), une carte géomorphologique de la région de Derborence et de la vallée de la Lizerne a été dressée au cours de l'année 2013. Cet article⁵ décrit la carte géomorphologique obtenue ainsi que la morphologie générale de la vallée. La méthode de cartographie est en outre présentée.

Derborence est un nom célèbre, titre du roman éponyme de Ramuz (Ramuz, 1934) et la région est un lieu apprécié des touristes et des scientifiques qui y retrouvent une nature particulière et sauvage. L'éboulement des Diablerets a contribué à sa renommée mais la plus grande valeur de cette région est très certainement sa richesse naturelle. Le cirque de Derborence se trouve en effet en un point charnière entre plusieurs climats très contrastés, entre différentes régions biogéographiques et également entre plusieurs unités tectoniques. Cette particularité est à l'origine de la très grande diversité écologique

⁵ Cet article sera publié, dans une version abrégée, dans le *Bulletin de la Murithienne* numéro 131 en automne 2015.

mais également géomorphologique de la région. C'est pour cette raison que Derborence a été choisi pour terrain d'étude pour ce mémoire dont la première étape est l'élaboration d'une carte géomorphologique, l'objectif étant de la transformer ensuite en une carte de la diversité géomorphologique.

Après une courte présentation des différentes études menées dans la région, nous présenterons le contexte (climatique, géologique, historique) particulier dans lequel s'inscrit Derborence ainsi que la méthode de cartographie utilisée. Dans un second temps, nous présenterons les différentes formes géomorphologiques visibles et tenterons d'en expliquer la genèse.

DERBORENCE, UN SITE ABONDAMMENT ETUDIÉ

Le site de Derborence est intéressant à bien des égards et de nombreuses recherches y ont été menées tant pour la géologie, dont l'explication du déclenchement de l'éboulement, que pour son intérêt au niveau de la biodiversité. La valeur de ce site a été reconnue il y a déjà plusieurs années ; la Murithienne, la société des sciences naturelles du Valais s'y était rendue en 1929 et le rapport de course publié à la suite (Farquet et Mariétan, 1929) montre bien l'intérêt que revêtait déjà alors la région pour les naturalistes tant au niveau de la faune, de la flore que de la géologie. Le propos de ce chapitre est de présenter quelques sources documentaires qui ont contribué à la connaissance de la région.

Le cirque de Derborence se situe au croisement de plusieurs unités tectoniques qui ont largement contribué à la compréhension des plis et nappes de charriage qui forment les Hautes Alpes calcaires. La région a ainsi fait l'objet de plusieurs publications de la série des « Matériaux pour la carte géologique de la Suisse ». Maurice Lugeon a notamment cartographié (carte spéciale n°60) et décrit la région de la Lizerne à la Kander entre 1897 et 1916 (Lugeon, 1914-1916). Le versant gauche de la vallée de la Lizerne ainsi que le plateau de Tsanfleuron, qui se situent en partie sur le terrain que nous étudions ici, y figurent. Les nappes de l'Ultraschweizer ont été décrites par Jacques-Henri Gabus (1958) et Pascal Jeanbourquin (1991), alors que la tectonique de la nappe de Morcles a été traitée par Héli Badoux (1972). Cette dernière référence contient une excellente planche

représentant l'ensemble du cirque de Derborence. Celle-ci a été reprise par Marcel Burri (1994) dans son ouvrage « Les Roches », paru dans la collection « Connaître la nature en Valais », illustré par de nombreux exemples de la région de Derborence. Les notices explicatives accompagnant les cartes de l'Atlas géologique de la Suisse (feuilles 1286 St-Léonard, 1305 Dt de Morcles et 1285 Diablerets (Badoux *et al.*, 1959 ; Badoux *et al.*, 1971 ; Badoux et Gabus, 1991)) sont également la source de précieuses références.

Les éboulements recouvrant le fond du vallon de Derborence ont été étudiés à plusieurs reprises d'un point de vue géologique. Une carte les représentant a notamment été publiée dans le Bulletin du Club Alpin Suisse en 1882 (Becker, 1882). Les causes possibles et une première estimation du volume des éboulements y sont présentées. En 1956, Louis Spiro publie « Derborence, Histoire de la catastrophe », un bon résumé de l'éboulement accompagné de textes décrivant la valeur du site (Spiro, Mariétan et Seylaz, 1956). Un travail de diplôme de l'Université de Genève a d'autre part été dédiée aux éboulements des Diablerets (Garazi et Moret, 1991). Cette étude géologique et géomécanique a permis de définir plus précisément les modalités du déclenchement de l'éboulement et le volume de roche concerné.

La région revêt d'autre part un intérêt particulier pour les hydrogéologues et les spéléologues. Les écoulements du plateau karstique de Tsanfleuron, un lieu largement documenté (voir notamment Reynard, 2008), rejoignent en partie le bassin versant de la Lizerne, en particulier les sources de la Lizerne (Chopard *et al.*, 2004 ; Weber, 2005 ; Gremaud, 2008, 2011 ; Savoy, Favre et Masotti, 2008). Les spéléologues apprécient également la région. Les gouffres du Mont à Cavouère et de Tsermettes ont été découverts par le Spéléo-Club Jura et des essais de traçage y ont été organisés (Jeannin et Beuret, 1995).

Toujours dans le domaine des géosciences, plusieurs levés géomorphologiques ont été réalisés dans la région par des étudiants de l'Université de Lausanne (Barcella et Studer, 1994; Jeanneret, 1995; Marguerat et Dadó, 1996). Ces levés de terrain sont composés de cartes géomorphologiques dessinées à la main et accompagnées de descriptions précises fournissant de nombreuses informations. Ces travaux ont servi de base à la réalisation de la carte géomorphologique présentée dans cet article. Des travaux ont par

ailleurs été menés au niveau du géotourisme, notamment dans le cadre d'une thèse de doctorat traitant de la valorisation du géopatrimoine (Martin, 2013), au sujet de la cartographie géotouristique (Regolini-Bissig *et al.*, 2009) ou encore dans le domaine de la vulgarisation des Sciences de la Terre (Pralong, 2001). Dans ce cadre, plusieurs guides de vulgarisation ont été publiés. Ainsi, un document décrivant une étape de la « Via Geo Alpina » (Cayla et Hobléa, 2011) concerne une partie du vallon (Schlup, Kozlik et Marthaler, 2009) et un guide documentant un parcours didactique sur les Hauts de Chamason décrit la géologie du sommet du vallon de la Derbonne (Rougier et Fournier, 2011). Finalement, à l'occasion des 300 ans de l'éboulement de Derborence, trois itinéraires didactiques s'adressant à des publics différenciés ont été tracés (Kozlik et Regolini, 2014 ; Regolini et Martin, 2014 ; Perret et Martin, 2014).

Derborence est également une région d'une grande valeur pour la biodiversité. Ses atouts au niveau floristique ont été largement décrits par Jacques Droz dans sa thèse de doctorat accompagnée d'une carte de végétation (Droz, 1989 et 1992). Le rapport de course de la Murithienne en 1929 est également précieux car de très nombreuses espèces y sont citées (Farquet et Mariétan, 1929).

De manière plus générale, d'excellentes monographies ont été publiées sur la région de Derborence. Ignace Mariétan (1960) publie dans le Bulletin de la Murithienne un article traitant de sujets aussi divers que la géologie, la faune et la flore. Théodore Kuonen (2000) a également publié une étude très complète, où il traite les questions de l'exploitation forestière et des alpages. Finalement, un nouvel ouvrage a été publié en 2014, à l'occasion du 300e anniversaire de l'éboulement des Diablerets (Rey Carron et Rey, 2014). Cet ouvrage traite notamment de la géologie (Sartori, 2014) et de la géomorphologie (Reynard et Martin, 2014) et une large place est consacrée à la faune et à la flore.

CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

La vallée de la Lizerne est située en rive droite de la vallée du Rhône. Derborence correspond au lieu-dit se trouvant au fond du cirque formé par la rencontre des vallons où

s'écoulent la Chevillence, la Derbonne et la Lizerne. La vallée était nommée Val Triquet ou Trois-Cœurs (Kuonen, 2000), ce qui pourrait faire référence aux trois passages dans la vallée que sont le Pas de Cheville (depuis Anzeinde), La Forcla (Chamoson) et le lapis de Mié (Sanetsch). Le nom de Derborence est aujourd'hui le plus commun, ceci, en partie certainement grâce au roman éponyme de C.-F. Ramuz, qui a rendu cette région célèbre, s'inspirant d'une légende née autour de l'écroulement de la paroi des Diablerets en 1714.

La région cartographiée dont nous allons traiter dans cet article correspond pratiquement à l'ensemble du bassin versant de la Lizerne (il manque une partie au Sud, dont les alpages d'Einzon et de Vertsan). Elle recouvre donc le cirque de Derborence, les vallons de la Derbonne, de la Chevillence et toute la vallée de la Lizerne (que nous nommerons haute et basse vallée selon que l'on se trouve à l'amont ou à l'aval du cirque de Derborence) (Fig. 2).

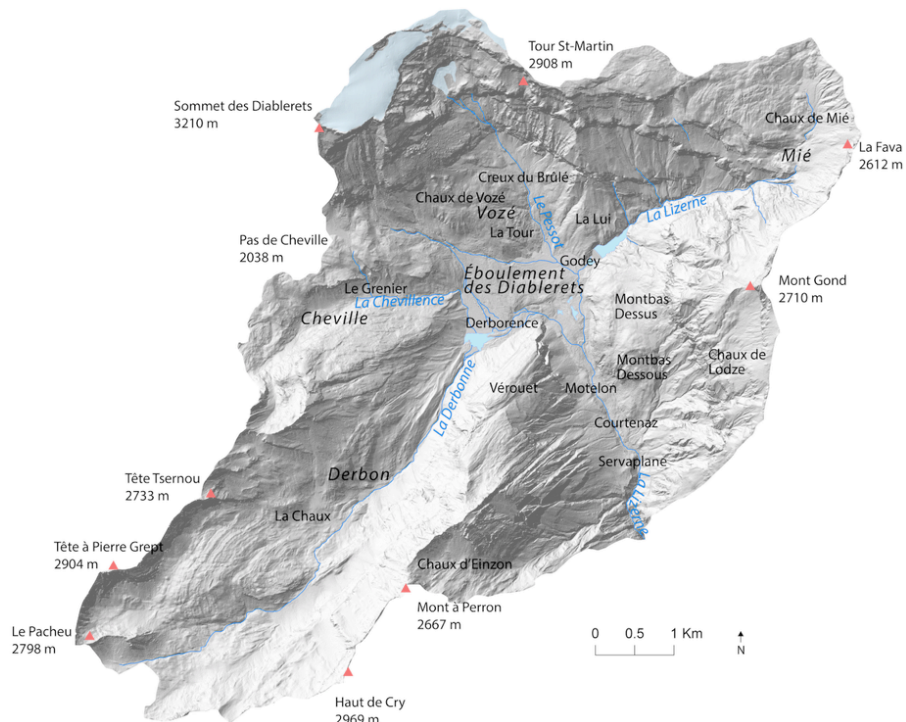


Figure 2 : Contexte géographique de la région cartographiée

CADRE CLIMATIQUE

La vallée de la Lizerne subit les influences de deux climats fortement contrastés, le bas de la vallée étant plus proche du climat continental du Valais central (plutôt sec), alors que l'influence atlantique se fait ressentir dans le cirque de Derborence et plus haut avec parfois de fortes pluies s'engouffrant depuis le Pas de Cheville. Une station de mesure météorologique a été installée par le CREALP à La Tour entre 1994 et 2007, à 1580m d'altitude. Les précipitations moyennes annuelles s'élevaient alors à 1600 mm et la température moyenne annuelle à 6.2°C (Fallot, 2014). Au vu de la topographie très particulière du site qui présente de grands écarts altitudinaux, des versants raides et de l'influence fortement contrastée des masses d'air, il est difficile de définir des gradients de température et de précipitations pour l'ensemble de la région, la microtopographie y jouant un rôle certainement bien plus important. Jacques Droz note que « *des conditions climatiques inhabituelles [...] règnent* » dans le cirque de Derborence (Droz, 1992). Jean-Michel Fallot a tout de même calculé des valeurs de précipitations et de températures pour différentes altitudes (Fallot, 2014). « Le climat de Derborence est très humide, comparativement aux autres régions du Valais » (Fallot, 2014 : 26). Cela est dû aux courants humides d'Ouest arrivant du Pas de Cheville qui amènent des nuages et des précipitations. Un vent d'Est (correspondant au foehn) descend également la vallée du Rhône et prend le chemin inverse (Fallot, 1986 cité dans Fallot, 2014). Plus localement, des courants thermiques se font ressentir sous forme de brises qui remontent les vallées le jour et descendent la nuit lorsque le temps est clair et le vent faible. De plus, la forme en cuvette de Derborence favorise l'accumulation d'air froid dans la première couche (environ 100 m).

CADRE GEOLOGIQUE

Les unités tectoniques affleurant dans la région sont toutes issues de la marge continentale européenne. On y trouve les nappes de Morcles, des Diablerets et du Mont Gond (Wildhorn) ainsi que l'Ultrasubalp qui font tous partie du domaine de l'Helvétique (*s.l.*) (fig. 3). Ces nappes sont constituées de grands plis couchés à un (Diablierets, Wildhorn) ou deux flancs (Morcles). Le cirque de Derborence se trouve exactement dans la zone de chevauchement de la nappe des Diablerets sur la nappe de Morcles. On

retrouve, coincée entre ces deux nappes, une fine bande d'Ultrahelvétique et de Flysch. La nappe du Mont Gond (Wildhorn) chevauche quant à elle la nappe des Diablerets. Elle constitue les sommets du versant de la rive gauche de la vallée de la Lizerne.

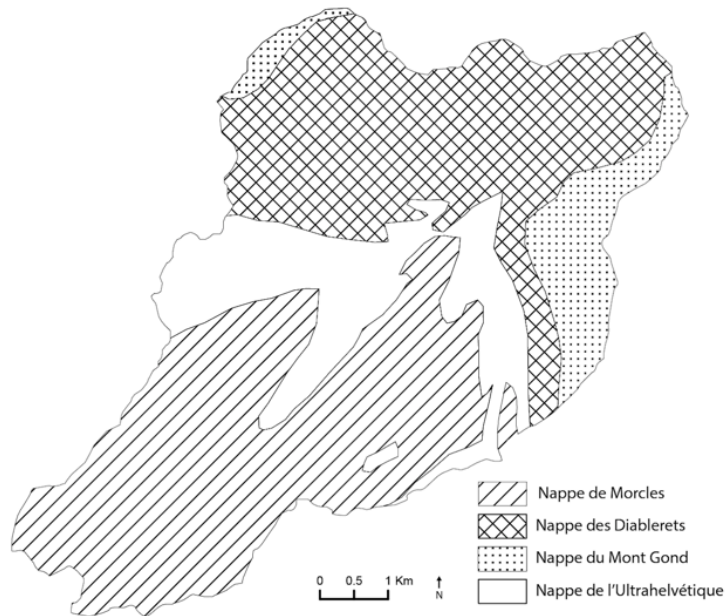


Figure 3 : Carte tectonique simplifiée

Les unités helvétiques *stricto sensu* présentent toutes des séries stratigraphiques semblables (du Jurassique inférieur à l'Oligocène) et sont principalement constituées de marnes, de grès et de calcaires. Le Jurassique est représenté par des schistes noirs de l'Aalénien, des schistes et des calcaires du Dogger, des schistes mordorés du Callovo-oxfordien, des alternances de marnes et de calcaires de l'Argovien et enfin des calcaires bleutés massifs du Malm. Le Crétacé est formé du Valanginien schisteux et du Valanginien calcaire, des couches à *Pygurus* du Valanginien supérieur, des calcaires de l'Hauterivien, des couches de Drusberg (alternances de marnes sombres et de calcaires), des calcaires clairs à faciès urgonien du Barrémien et enfin des calcaires jaunâtres à interlits ferrugineux de l'Aptien. L'Eocène inférieur est formé du Sidérolithique, formant des poches et lentilles dans le karst. L'Eocène supérieur est constitué des Couches à Cérithes, de grès et calcaires nummulitiques, de schistes et marnes à globigérines et enfin des Grès de Taveyanne. Pour une description détaillée de ces différentes unités,

nous renvoyons aux notices explicatives des cartes géologiques de la région (Badoux *et al.*, 1959 ; Badoux *et al.*, 1971 ; Badoux et Gabus, 1991).

La nappe de Morcles forme une série de synclinaux et d'anticlinaux dont les plis sont déjetés vers le Nord-Ouest. En rive droite du bas de la vallée de la Lizerne, les couches sont en partie en position de dip-slope (la pente topographique correspondant au pendage des couches géologiques) et forment de grandes dalles rocheuses séparées par de profonds chenaux. Le vallon de la Derbonne est situé en bordure d'une charnière synclinale. Le massif situé entre le Haut de Cry et le Mont à Cavouère est constitué d'une série de plis complexes, alors qu'en rive gauche du vallon de la Derbonne, un anticlinal forme la Tête Pegnat (fig. 4). Les flancs de la colline de Montbas font également partie de la nappe de Morcles et le replat de Montbas est constitué par les flyschs de la nappe de Morcles.



Figure 4 : Coupe géologique à travers les vallons de la Derbonne et de la Lizerne (Planche extraite de Badoux et Gabus, 1991)

La nappe des Diablerets forme de grandes parois en marches d'escalier qui referment le cirque de Derborence au Nord et constituent le bas du versant de la rive gauche de la Lizerne. Le haut de ce versant (notamment la Tour St-Martin) appartient à la nappe du Wildhorn qui se trouve en position renversée (Gremaud, 2008). Les sommets comme la Fava et le Mont Gond sont ainsi constitués de roches plus anciennes (Jurassique) que les parois qui les soutiennent (Hauterivien et Valanginien du Crétacé). Le synclinal de raccord entre les nappes des Diablerets et du Wildhorn se trouve sur le versant gauche de la haute vallée de la Lizerne.

L'Ultraschélvétique est constitué des flyschs de la Plaine Morte, de la nappe d'Anzeinde et de Bex (Jeanbourquin, 1991) et constitue la base des parois des Diablerets et de la rive gauche de la Lizerne. Ces unités forment une topographie adoucie et sont soumises à des mouvements de terrain. La nappe de Bex, notamment, est constituée de gypses du Trias formant les pyramides de La Tour.

Les différentes formations décrites plus haut influencent la morphologie du relief de manière différenciée. Les escarpements structurant les parois du cirque de Derborence sont constituées de calcaires du Malm, du Valanginen, du Barrémien (faciès urgonien) et nummulitiques dans une moindre mesure (sommet de la Tour St-Martin). Les vires les séparant sont constituées de roches plus sensibles à l'érosion comme des schistes ou des marnes. Cette alternance de couches plus ou moins sensibles à l'érosion créant des vires ou des escarpements est à l'origine de la forme « en marches d'escaliers » des parois. Les calcaires massifs forment des lapiés lorsque le pendage est moins important, comme on peut en rencontrer dans le haut vallon de la Derbonne (« Les Crêtes ») dans les calcaires du Malm, sur la rive droite du vallon de la Chevillence (les Grands Tours) et les lapiés de Mié dans les calcaires urgoniens, ou encore sur la rive gauche du vallon de la Derbonne, dans les calcaires du Valanginen. Les terrains où affleurent les couches de Drusberg ou les marnes et calcaires de l'Argovien sont plus facilement recouverts de végétation, alors que le Valanginen schisteux est plus sensible à la gélifraction et forme de nombreux éboulis.

METHODE DE CARTOGRAPHIE

La légende géomorphologique de l'Université de Lausanne

La carte géomorphologique présentée dans cet article a été créée à l'aide de la légende géomorphologique de l'Université de Lausanne (voir notamment Schoeneich, 1993 ; Schoeneich, Reynard et Pierrehumbert, 1998). Créée initialement pour des levés de terrain réalisés à la main sur un fond de carte au 1 : 10'000, la légende a évolué pour être utilisée de manière informatisée, d'abord à l'aide d'un logiciel de dessin (Adobe Illustrator) (Schoeneich, Reynard et Pierrehumbert, 1998) et à présent à l'aide d'un logiciel de système d'information géographique (SIG) (ArcGIS) (Lambiel *et al.*, 2015). La légende de l'Université de Lausanne permet la création de cartes morphogénétiques ; cela signifie

que l'on attribue un processus à chaque forme du terrain selon son origine. Par exemple un éboulis aura une origine gravitaire, une moraine une origine glaciaire et un lapiaz une origine karstique. Chaque processus se voit attribuer une couleur. Les formes d'accumulation sont figurées à l'aide d'une couleur de fond selon le processus principalement actif alors qu'un fond blanc représente les zones d'érosion. Lorsque plusieurs processus se sont succédés dans le temps, on représente en principe le plus récent. Les figurés peuvent être des points, des lignes ou des surfaces, répartis en trois couches différentes dans le logiciel SIG.

Le travail de cartographie

La carte a été réalisée à l'aide du système d'information géographique (SIG) ArcGIS. Ce logiciel permet de visionner plusieurs couches référencées spatialement. Nous avons ainsi utilisé différentes sources d'information : les levés géomorphologiques réalisés à l'Université de Lausanne (Barcella et Studer, 1994; Jeanneret, 1995; Marguerat et Dadó, 1996), ainsi que des photographies aériennes, cartes topographiques et modèles numériques de terrain de swisstopo et les cartes géologiques (Badoux *et al.*, 1959; Badoux *et al.*, 1971; Badoux et Gabus, 1991). Si ces outils fournissent d'excellentes informations, l'identification sur le terrain reste indispensable, en particulier dans les zones recouvertes par la forêt. Par contre, pour les régions difficilement accessibles à pied et en raison de la taille du terrain d'étude, le logiciel Google Earth offre une bonne alternative en complément au travail de terrain.

Le travail de cartographie ne peut se faire sans avoir choisi, au préalable, l'échelle du fond de carte et, parallèlement, la précision des figurés. Cela est d'autant plus important que lorsque le travail est fait à l'aide d'un logiciel SIG, il est très facile de changer d'échelle, il faut donc se contraindre et choisir le degré de précision de la cartographie au départ. La carte est prévue pour être imprimée à l'échelle 1 : 25'000 mais les levés géomorphologiques se font traditionnellement sur des cartes au 1 : 10'000. Nous avons ici choisi une précision de 100 m, ce qui représente 1 cm sur une carte au 1 : 10'000. Le fond de carte est la carte nationale au 1 : 25'000 ; la carte géomorphologique devait donc correspondre au support. Nous avons travaillé à l'aide de la carte topographique de 2008, alors que le modèle numérique de terrain utilisé (swiss ALTI^{3d}) datait de 2011. Il a dès lors fallu se référer à la carte nationale car c'est cette dernière qui constitue le fond de la carte

imprimée alors même qu'elle est plus ancienne et moins précise que le modèle numérique de terrain utilisé pour identifier les formes.

LA GEOMORPHOLOGIE DE DERBORENCE

Les formes visibles

Nous présentons ici les différentes formes du relief qui ont été cartographiées (voir carte en annexe) en fonction des processus qui les ont générés (formes structurales, karstiques, gravitaires, etc.).

Les *formes structurales* sont figurées en rouge sur la carte. Les failles les plus marquantes sont visibles sur le versant droit du bas de la Vallée de la Lizerne, où elles donnent naissance à des ravines. Les failles de la nappe de Morcles sont nombreuses et généralement orientées du Sud-Ouest au Nord-Est ou d'Est en Ouest. Dans la nappe des Diablerets, quelques failles sont visibles sur le haut des parois et en rive droite de la partie haute de la vallée de la Lizerne. Les escarpements rocheux marquent généralement la présence des calcaires massifs du Malm, du Valanginien et du Barrémien. Les autres formes structurales (charnières de plis, etc.) n'ont pas été indiquées pour éviter de surcharger la carte et parce que ce ne sont pas des formes strictement géomorphologiques.

Les *formes karstiques*, représentées en turquoise, sont principalement de grandes zones de lapiés parfois démantelés ou recouverts de végétation (fig. 5). On trouve de grands lapiés dans le vallon de la Derbonne, dans les calcaires du Malm, de l'Hauterivien et du Barrémien (fig. 6). Ils présentent souvent de nombreuses rigoles de ruissellement sub-parallèles. Une vaste étendue karstique dans les calcaires urgoniens forme également les lapiés de Mié (fig. 7). D'autre part, de nombreuses dolines sont visibles, en particulier dans les gypses de La Tour, où l'on trouve également des pyramides de gypse (fig. 8), ou encore sur le versant de La Lui. D'importants réseaux karstiques existent d'autre part dans le sous-sol ainsi qu'une multitude d'autres formes d'origine karstique (grottes, pertes, résurgences) qui n'ont pas toutes pu être cartographiées pour des questions d'échelle (voir Favre, 2014 pour plus d'informations).



Figure 5 : Lapiés en partie recouverts de végétation dans les calcaires urgoniens.

Figure 6 : Erosion karstique dans les calcaires urgoniens (blancs au premier plan), les calcaires siliceux (brunâtres au second plan) et les calcaires valanginiens (clairs, visibles à gauche) en rive gauche du vallon de la Derbonne.

Figure 7 : Le lapiés de Mié avec le cirque de Derborence en arrière-plan.

Figure 8 : Les pyramides de gypse de La Tour.

Le *processus gravitaire*, figuré en ocre, est certainement le plus souvent représenté sur la carte. La forme la plus marquante est le dépôt des éboulements des Diablerets (fig. 9). Il s'étend du pied de la Tête de Barne (à environ 2200 m d'altitude), recouvre tout le fond du cirque de Derborence et se poursuit dans la vallée de la Lizerne jusqu'à la hauteur de Courtenaz. Le haut du dépôt recouvre le sommet du Six Blanc au Nord et s'étend vers l'Est au pied de Vozé. Il est entaillé par deux torrents. Dans le cirque de Derborence, le dépôt est recouvert par des cônes de déjection torrentiels et le lac de Derborence. Il s'arrête contre la paroi rocheuse du mont de Véroutet (paroi de L'Ecorcha) au Sud et contre le bas des parois de la colline de Montbas à l'Est. C'est cette dernière qui a visiblement dévié l'éboulement en direction du SSE jusque dans la zone comprise entre Courtenaz et Servaplaine (à environ 1135 m d'altitude). Le haut de l'éboulement est

fortement raviné et constitué de matériel fin en surface alors que le bas est constitué de gros blocs et recouvert de végétation.

Les voiles et cônes d'éboulis sont très nombreux : ils recouvrent les pentes raides du versant droit du vallon de la Derbonne, les bases des sommets et la partie basse de la rive gauche de la Lizerne, ainsi que plusieurs zones dans les parois au Nord du cirque de Derborence. Le processus gravitaire n'est souvent pas l'unique facteur en cause dans la formation de ces dépôts ; les avalanches et les torrents agissent également dans le transport et le dépôt des sédiments (fig. 10). À basse altitude, les éboulis sont souvent inactifs et recouverts de végétation, notamment sur les bas de versants dans la vallée de la Lizerne et le vallon de la Derbonne. Quelques formes de tassement sont visibles dans la région. C'est le cas du versant de Vozé (fig. 11), dans des affleurements de cornieules et de gypse du Trias recouverts de matériel morainique ou encore dans le « Valanginien schisteux » à la hauteur de « Les Plans des Fosses », dans le vallon de la Derbonne.

Les processus gravitaires ont également une action érosive majeure. De nombreuses niches d'arrachement et couloirs d'éboulis sont visibles. La niche d'arrachement la plus importante est celle des éboulements des Diablerets située entre la Tête de Barne (3185 m) et le point 3041 (Sartori, 2014) (fig. 12). D'autres niches de plus faible ampleur se trouvent dans les parois de la rive gauche de la vallée de la Lizerne dans le « Valanginien schisteux », sur le versant de Vozé (niche d'arrachement du tassement de versant) ou encore au bas de la terrasse de Servaplane et en rive gauche du lac du Godey, dans les moraines. Comme pour les couloirs d'éboulis, les niches d'arrachement sont souvent difficiles à attribuer au seul processus gravitaire ; en effet, ces formes sont pour la plupart dues à des processus à la fois gravitaires, nivaux et torrentiels selon la saison et la quantité de neige ou d'eau disponible. Les couloirs d'éboulis sont très nombreux et visibles dans les éboulis ou suivant les structures géologiques, comme cela est le cas en rive droite du bas de la vallée de la Lizerne (fig. 13).

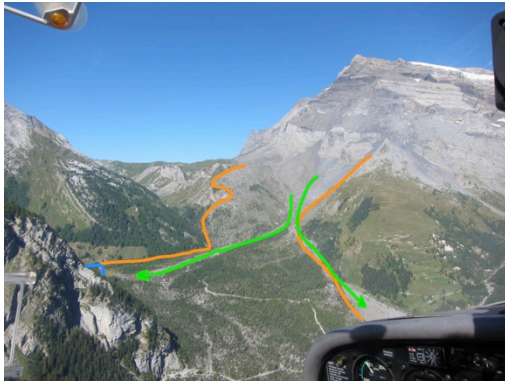


Figure 9 (en haut à gauche) : Le dépôt de l'éboulement, le sommet des Diablerets en arrière-plan, le lac de Derborence sur la gauche et le versant de Vozé sur la droite.

Figure 10 (en haut à droite) : Voile d'éboulis polygénique ; les avalanches jouent également un rôle dans la formation de ces éboulis.

Figure 11 (au milieu à gauche) : Tassement de versant à La Tour (Vozé)

Figure 12 (en bas à droite) : Niche d'arrachement de la Tête de Barme

Figure 13 (en bas à gauche) : Coulloirs d'éboulis suivant la structure géologique (Mont à Cavouère)

Le processus ayant eu la plus grande influence sur la morphologie générale de la vallée, après la tectonique, est l'action des *glaciers*, représenté en violet. Les dernières grandes glaciations ont modelé la région créant de larges vallons. À grande échelle, l'action des

glaciers est marquée dans le vallon de la Derbonne, par-dessus le Pas de Cheville, sur tout le versant sud des Diablerets et le long de la vallée de la Lizerne. Les marques d'érosion glaciaire sont assez peu nombreuses : on observe quelques verrous glaciaires notamment dans le vallon de la Derbonne (fig. 14), au bas de Mié (Poteu des Étales) et de la colline de Montbas. Plusieurs cirques glaciaires sont également visibles sur les sommets ; notamment dans le massif des Diablerets, au-dessus du glacier de Tschiffa (fig. 15) et entre la Tête à Pierre Grept et le Pacheu. De plus petits cirques se trouvent au pied de la crête en direction de la Tête Pegnat. La seule auge glaciaire bien conservée se trouve dans la vallée de la Lizerne, à la hauteur de Montbas (fig. 16). Les dépôts glaciaires ne sont pas très nombreux. On en trouve localement sur les replats et fonds de vallées principalement sous forme de placage morainique. Cette relative absence de formes de dépôts glaciaires est due à la topographie particulière de la région et à l'activité des processus gravitaires. Lorsque les pentes sont trop abruptes, le glacier n'a pas pu déposer de sédiments et les fonds de vallées ont souvent été recouverts par les éboulements. Du placage morainique recouvre la colline de Montbas, le versant de la Lui et le Creux du Brûlé, à proximité du lac de Derborence et en direction du Pas de Cheville. De nombreux autres dépôts de moindre importance se trouvent çà et là. Les dépôts glaciaires sont également présents sous forme de crêtes morainiques. Les plus anciennes, à une altitude d'environ 1500 m se trouvent sur la colline de Montbas, sur le versant de la Lui, aux abords du lac de Derborence et dans le vallon de la Chevillence (fig. 17). On trouve également des moraines à environ 1800 m d'altitude, à la Chaux de Vozé et la Chaux de Derbon, et à environ 2000 m, aux abords du Pas de Cheville. Les moraines les plus récentes, à environ 2300 m d'altitude, se trouvent aux abords des glaciers de Tschiffa et de Tita Naire, ainsi qu'au bas des crêtes entre Le Pacheu et la Tête Tsernou et à proximité du glacier des Diablerets. Ces dernières ne sont pas recouvertes de végétation, contrairement aux précédentes.

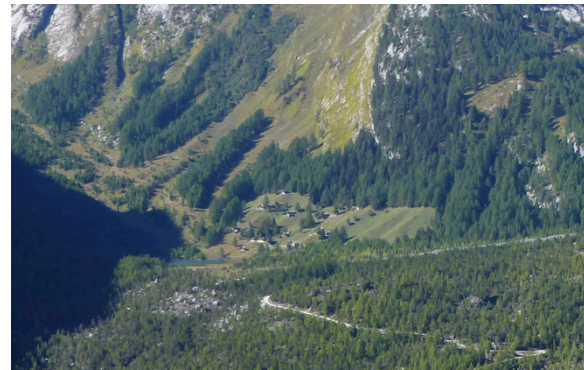


Figure 14: Verrous glaciaires du vallon de la Derbonne

Figure 15: Cirques glaciaires de Tschiffa

Figure 16: Auge glaciaire de Montbas

Figure 17: Crêtes morainiques

Les *formes périglaciaires*, figurées en rose, sont très peu nombreuses. Localement, des dépôts de sédiments ayant subi une déformation par le gel et le dégel forment des éboulis fluants. Quelques glaciers rocheux résultant de la reptation du pergélisol sont actuellement fossilisés. Ces dépôts sont visibles notamment dans le vallon de la Derbonne et de la Chevillence. La forme la plus marquante est certainement le glacier rocheux fossile se trouvant à l'amont du Grenier de Cheville, formant un amas de gros blocs arrangés sous forme de bourrelets séparés par des dépressions et recolonisés par de petits arbres (fig. 18).

Les *processus fluviatiles*, ou plus exactement torrentiels, représentés en vert, déplacent de grandes quantités de sédiments. On observe d'importants cônes de déjection par dessus l'éboulement des Diablerets formés par les torrents de la Chevillence depuis l'ouest, du Pessot depuis le « Creux du Brûlé » au Nord (fig. 19) et deux autres prenant leur source au lieu-dit « Grands Creux », au sommet du dépôt de l'éboulement. Ces cônes

de grande taille, qui ont moins de 300 ans, témoignent de l'intensité de l'activité torrentielle. Ils sont alimentés par l'érosion des niveaux de calcaires schisteux, dans le versant des Diablerets. D'autres cônes de déjection torrentiels de moindre importance sont visibles au fond du vallon de la Derbonne et à la Chaux de Mié. Les chenaux d'écoulement de laves torrentielles, ravines et niches d'arrachement torrentiels sont également nombreux. Ces chenaux jouent en particulier un rôle très actif en rive gauche de la vallée de la Lizerne où ils perturbent souvent le trafic à la hauteur de Courtenaz. Les chenaux d'écoulement des torrents cités précédemment ont été partiellement endigués pour éviter leur débordement sur la route.

Les *formes hydrographiques* existant dans la région, figurées en bleu ciel, sont les rivières (Chevillence, Derbonne, Lizerne et leurs affluents), les lacs dont Derborence et le lac du barrage du Godey ainsi que les glaciers. Ces derniers sont au nombre de trois. Le glacier des Diablerets, celui de Tschiffa (glacier régénéré en partie recouvert de sédiments) et le glacier de Tita Naire. Les glaciers de Tschiffa et de Tita Naire sont de taille très réduite et certainement voués à disparaître rapidement.

De nombreux endroits ont été cartographiés à l'aide du figuré « *sol sur roche en place* », en vert clair, la roche-mère se trouvant dans ce cas à faible profondeur mais étant recouverte d'un sol, voire même de forêts. Ces zones de végétation recouvrent parfois des surfaces qui ont subi l'érosion glaciaire, karstique ou gravitaire mais ces processus ne sont plus actifs ; ainsi, le processus « organogène » (pédogenèse) est considéré comme le plus actif.

L'Homme a également eu une influence sur la morphologie de la région. Les formes découlant directement de l'activité humaine sont représentées en gris. La route a notamment laissé une trace importante par dessus le dépôt de l'éboulement, traversant tout le cirque de Derborence. D'autre part, un barrage de retenue et un bassin amortisseur ont été construits aux abords du Godey et deux prises d'eau se trouvent à l'aval pour récupérer les eaux de la Derbonne et du Pessot. Ces deux dernières sont souvent accompagnées de zones de remblais. D'autre part, plusieurs digues ont été aménagées sur les cônes de déjection occupant le fond du cirque afin de protéger les infrastructures mais également pour éviter le comblement du lac de Derborence (fig. 20).



Figure 18 : Glacier rocheux fossile à l'amont du Grenier de Cheville

Figure 19 : Cônes de déjection du torrent du Pessot et du torrent arrivant des « Grands Creux »

Figure 20 : Chenal d'écoulement torrentiel endigué et cône de déjection se jetant dans le lac de Derborence

La genèse des formes

L'histoire du relief visible dans la région de Derborence est très longue. Certains processus sont actifs de nos jours alors que d'autres trouvent leur origine il y a près de 250 millions d'années. C'est le cas de certaines roches qui se sont formées durant l'ère secondaire, alors qu'un océan, la Téthys, s'agrandissait entre les continents africain et européen (Burri 1994 ; Marthaler 2001). Les sédiments qui se sont déposés en bordure nord de cet océan, sur le continent européen, ont ainsi formé des couches de calcaires clairs dans des environnements de plate-forme continentale (dépôts coquilliers, formation récifales, etc.) ou plus marneuses lorsqu'il y a eu apport de sédiments fluviatiles ou dans les environnements plus profonds. Ces alternances sont bien visibles dans la paroi des Diablerets. Au début de la phase de sédimentation, au Trias, sous climat tropical sec, des

dépôts d'évaporites – représentés ici par les affleurements de gypse de l'Ultrahelvétique affleurant dans le versant de La Tour et de La Lui – ont pris place dans des bassins encore peu profonds. Au Jurassique, la mer est bien présente, comme cela est visible, par exemple, dans les calcaires massifs du Malm, les parois les plus marquantes du cirque de Derborence. Durant le Crétacé s'accumulent des calcaires et marnes. Les niveaux les plus argileux ont été métamorphisés en schistes lors de l'orogénèse alpine ; ces terrains sont fragiles et sensibles à l'érosion torrentielle.

Parallèlement à la sédimentation, commence la déformation. Dès 100 millions d'années, lorsque la Téthys commence à se refermer, ces dépôts sédimentaires ont été enfouis et plissés, formant un prisme sédimentaire qui a lentement été surélevé à partir du Sud du Valais (Marthaler 2001). Les roches se trouvant dans la région de Derborence sont toutes issues des bassins sédimentaires du domaine de l'Helvétique, qui se sont développés sur les massifs cristallins externes qui en constituent le socle. Ce dernier a relativement peu subi le plissement en comparaison avec la couverture, plus souple (Burri 1994 : 46). Ce sont tout d'abord les nappes les plus méridionales de l'Ultrahelvétique, plus marneuses, qui ont glissé sur les bassins des nappes helvétiques (Diablerets, Wildhorn) et autochtones (Morcles) dès la fin de l'Eocène et au début de l'Oligocène. Par la suite, la nappe de Morcles a à son tour subi des déformations, entraînant l'Ultrahelvétique dans ses plis (*ibid.* : 57). Les nappes des Diablerets et du Wildhorn ont ensuite « chevauché » ces dernières. Pour terminer, le socle a subi un soulèvement – dans la région des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges – qui s'est traduit par un plongement axial des nappes helvétiques en direction du Nord-Est, les angles maximaux se trouvant dans la nappe de Morcles, dans les parois situées au Sud du cirque de Derborence avec des valeurs de 40° (Badoux & Gabus 1991 : 51). Dans le cirque de Derborence, les « diverticules » de l'Ultrahelvétique se retrouvent pincées entre les nappes de Morcles et des Diablerets. Elles sont notamment constituées de flysch, témoins des avalanches sous-marines qui se sont produites alors que les premiers reliefs se formaient, durant le Tertiaire. Ces formations marquent le début de l'érosion des reliefs.

Effectivement, dès que les roches ont été élevées au-dessus du niveau de la mer, de nombreux facteurs d'érosion sont entrés en jeu pour modeler le relief. L'érosion karstique, par exemple, est très importante dans les calcaires riches en carbonate de calcium. On

en trouve les marques dans les nombreux lapiés et dolines, lorsque les calcaires se trouvent en position horizontale. Par contre, lorsque ces mêmes roches se trouvent en parois verticales, elles se fracturent par gros blocs, provoquant des éboulis, voire des éboulements. Les niveaux marneux, quant à eux « *favorisent une forte érosion par leur imperméabilité qui oblige l'eau à ruisseler sur la surface du terrain* » (Burri, 1994 : 22). Ces différentes formations subissent une érosion différentielle selon leur origine. Superposées dans des parois, elles forment des reliefs en marches d'escalier, les couches résistantes restant en saillie, alors que les niveaux plus tendres forment des vires. Les facteurs en cause dans cette érosion sont tout d'abord la gravité mais également l'action mécanique par l'eau (ravinement dans les niveaux marneux) et le gel (gélifraction des parois calcaires).

Les variations climatiques passées ont également agi sur la formation du relief, en particulier par l'action mécanique des glaciers. Durant le Quaternaire (derniers 2.6 millions d'années), la Terre a subi une longue période de glaciations au Pléistocène (jusqu'à 11 500 BP), séparées par des phases interglaciaires, au climat plus doux. Ce sont en partie ces glaciers qui ont creusé le cirque de Derborence et les différents vallons latéraux. Ce travail d'érosion a été fortement contraint par la structure géologique – notamment l'alternance entre calcaires résistants et roches schisteuses plus tendres – et par l'érosion différentielle. Plusieurs verrous ont été préservés, soit en position transversale, notamment dans le vallon de la Derbonne, soit en position longitudinale, dans le cas du seuil de Montbas, en rive gauche de la Lizerne. Au débouché des dépôts de l'éboulement dans la vallée aval, la forme en auge glaciaire de la vallée témoigne de ce travail d'érosion par les glaciers. Plus bas, la configuration tectonique (plongement des couches vers le Sud-Est) donne à la vallée un profil dissymétrique, s'éloignant du profil d'auge glaciaire classique (fig. 16). Les dépôts glaciaires sont tous attribués à la dernière glaciation – le Würm, entre 115 000 et 11 500 BP – et à l'Holocène (période interglaciaire débutant vers 11 500 BP). Lors du dernier maximum glaciaire, il y a 25 000 ans, le glacier du Rhône se prolongeait jusqu'à Wangen an der Aare au Nord-Ouest et à l'aval de Genève à l'Ouest (Schlächter, 1988; Schoeneich, 1998; Coutterand, 2010). La région de Derborence était située dans la zone d'accumulation de ce glacier et la hauteur de la glace est estimée à une altitude d'environ 2500 m (Schlächter *et al.*, 2009). Les sommets entourant le cirque de Derborence et les vallées de la Lizerne et de la Derbonne étaient donc certainement visibles. Au Tardiglaciaire (entre 22 000 et 11 500 BP), le climat se

réchauffe et les glaciers reculent ; les glaciers des vallées latérales du Rhône se séparent du glacier principal. Dans le Valais central, ce découplage a dû avoir lieu à la transition Pléniglaciaire – Tardiglaciaire (environ 17 000 BP ; Cutterand *et al.*, 2015). Dans la vallée de la Lizerne, contrairement à d'autres vallées du Valais central (Morge, Sionne, Liène), aucun dépôt d'obturation du glacier du Rhône (dépôts glacio-lacustres associés au stade de Rumeling ; Dorthe-Monachon, 1993) n'a été conservé en raison des fortes pentes dans les gorges de la Lizerne. Plus haut, les moraines de Montbas peuvent être attribuées à un stade de retrait du Tardiglaciaire, mais elles n'ont pas pu être datées plus précisément. Il en est de même des quelques témoins latéraux des vallons de la Derbonne et de la Chevillence. L'indigence des témoins morainiques construits et l'absence de continuité entre les moraines ne permettent pas d'utiliser les méthodes classiques de reconstitution des stades glaciaires. En effet, la méthode paléogéographique, qui calcule la dépression de la ligne d'équilibre des glaciers doit commencer par l'identification des cordons morainiques (Scapozza, 2013 : 360). La méthode du marteau de Schmidt a été testée à proximité de notre terrain d'étude (Chamosentse) par Cristian Scapozza qui a tenté de dater des roches moutonnées dans des calcaires siliceux du Bajocien inférieur. Cette méthode n'a pas produit de résultats satisfaisants : il semblerait que la karstification de la roche fausse la datation (*ibid.* : 443). Les moraines situées au front des glaciers de Tita Naire et de Tschiffa ainsi qu'en direction de Tsanfleuron, datent quant à elle du Petit Age Glaciaire (PAG) (1350 – 1850 ap. J.-C.). La ligne d'équilibre pour le stade de référence de 1850 (fin du PAG) a été estimée à une altitude de 2940 m pour les glaciers des Diablerets/Tschiffa et de 2495 m pour le glacier de Tita Naire (Dorthe-Monachon et Schoeneich, 1993). En comparaison avec d'autres vallées latérales du Rhône, la vallée de la Lizerne et Derborence se distinguent par l'abondance des formes d'accumulation gravitaire et ainsi par la faible représentation relative des témoins glaciaires.

Suite aux périodes glaciaires, les glaciers se retirent et les versants se rééquilibrent. Les crises paraglaciaires sont liées à une intensification de la morphogenèse ainsi qu'à un accroissement des taux d'ablation et des transferts sédimentaires (Mercier, 2010; Scapozza, 2013). La pression exercée par la glace sur les parois des vallées s'amointrissant, de nombreux éboulements se déclenchent ainsi dans les Alpes par décompression des parois. Comme déjà précisé plus haut, la région de Derborence est particulièrement touchée par les processus gravitaires. L'exemple le plus marquant est

évidemment le dépôt des éboulements de 1714 et 1749. L'origine du premier éboulement serait principalement liée à la fragilité de la paroi des Diablerets (due à sa morphologie et aux fractures de la roche) (Sartori, 2014). Celle-ci a certainement été accentuée par un tremblement de terre qui a eu lieu deux ans plus tôt. D'autre part, il semblerait que cette période ait été particulièrement froide et il se pourrait que la fonte d'importantes quantités de neige et de glace durant l'été ait favorisé le déclenchement de l'éboulement. L'éboulement de 1749 s'est très certainement déclenché en raison de la déstabilisation du versant par le premier événement (Garazi et Moret, 1999 ; Sartori, 2014).

A côté de ces événements subits, la gravité agit également de manière continue. On peut l'observer dans les nombreux éboulis se trouvant au pied des parois ainsi que dans les tassements de versant affectant, par exemple, le versant de Vozé. Le soubassement est constitué d'un « *mélange de formations du Trias de la nappe de Bex et de flysch de la nappe de Morcles* » (Garazi et Moret, 1999 : 33) ; en effet, les massifs reposant sur le Trias (gypse ou cornieules) donnent lieu à des tassements qui évoluent souvent en glissements ou en éboulements (Badoux et Gabus, 1991 : 44). La gravité est pourtant rarement le seul agent d'érosion et de transport : l'eau, sous toutes ses formes (liquide, glace, neige) contribue fortement à remodeler le paysage et mobiliser les sédiments. Les systèmes torrentiels sont particulièrement actifs à Derborence dans les niveaux les plus imperméables que sont la région de l'éboulement, les zones recouvertes de placage morainique ou les niveaux marneux. Suite au retrait des glaciers dans les différentes vallées latérales du Rhône, les rivières ont entamé leur travail d'érosion pour atteindre un profil d'équilibre. Les gorges de la Lizerne, au débouché dans la vallée du Rhône, sont les témoins de cette érosion rapide qui a eu lieu dans la plupart des vallées latérales de la région. Les verrous glaciaires des vallons de la Derbonne ou de la vallée amont de la Lizerne ont également été incisés en gorges de plus faible ampleur. En hiver, les avalanches contribuent également à l'érosion et au déplacement des sédiments. On observe leur activité sur toute la rive droite de la vallée de la Derbonne, où de nombreux arbres sont arrachés. Les quelques arbres se trouvant sur les cônes d'éboulis ont d'ailleurs une forme caractéristique en arc de flèche, due à l'activité des avalanches mais également aux mouvements du terrain. Ces mouvements trouvent parfois leur origine dans la reptation du pergélisol : quelques éboulis aux formes bombées traduisent la présence de glace interstitielle. Le glacier rocheux de la vallée de la Chevillence est un témoin d'une période froide, étant aujourd'hui inactif mais quelques *protalus ramparts* de

faible importance contiennent certainement encore de la glace (en particulier dans le vallon de la Derbonne). Ces processus restent cependant anecdotiques dans la région et ont une très faible influence sur l'ensemble de la morphologie de la vallée.

L'Homme a également agi sur la morphologie de la vallée, mais son influence est très récente en comparaison avec les autres processus. Derborence est encore bien préservée de son action, grâce aux différentes zones de protection mises en place. D'ailleurs, son activité a probablement même permis d'éviter le comblement du lac de Derborence en érigeant des digues pour contenir l'activité torrentielle.

CONCLUSION

La géomorphologie de Derborence connaît des origines multiples. L'influence de la tectonique est particulièrement marquante dans les plissements et les grandes parois et dalles rocheuses. Les lithologies variées favorisent une érosion différentielle bien visible dans de nombreux versants. Les phénomènes d'érosion karstique sont également particulièrement marquants, représentés par les vastes lapiés et les nombreuses dolines. Si les glaciers ont modelé les grandes lignes de la région en cirques et vallées, l'activité gravitaire a été très importante par la suite et a recouvert la majorité de leurs dépôts. La région de Derborence est particulièrement célèbre pour ses atouts en matière de biodiversité mais elle gagne également à être reconnue pour sa richesse d'un point de vue géomorphologique.

Cartographie de la diversité abiotique : état de la question et proposition méthodologique

Hélène Maret

Institut de géographie et durabilité,
Université de Lausanne
helene.maret@unil.ch

Résumé

Cet article présente une méthode de cartographie de la diversité géomorphologique basée sur une carte géomorphologique développée selon la légende de l'Université de Lausanne. Dans un premier temps, les différentes études ayant proposé des cartes de diversité abiotique sont présentées et analysées. La méthode présentée ici s'inspire de ces études tout en s'en démarquant de manière à proposer une alternative originale.

Abstract

This paper presents a method developed to transform a geomorphological map into a map of geomorphological diversity. In other words, we transformed a qualitative geomorphological map (morphogenetic map) into a quantitative map (including the value of a geomorphological diversity index). In a first part, several studies are analysed and compared. The proposed method is inspired by these studies and proposes an original alternative.

INTRODUCTION

« La carte est plus qu'une simple image visuelle ou photographique d'une région donnée, elle constitue le moyen le plus efficace pour enregistrer, calculer, révéler, analyser et comprendre les relations spatiales qui existent entre les différents phénomènes concrets ou abstraits dont la localisation est géographique » (Cuenin, 1972). La cartographie est une technique permettant une abstraction, une simplification de la réalité. Une carte est une représentation, son élaboration implique donc des choix, tant au niveau de la sémiologie graphique que de l'échelle de représentation (voir notamment Bertin, 1977 et 1999, Brunet, 1987).

« La géomorphologie [...] est la science qui a pour objet la description et l'explication du relief terrestre [...] » (Coque, 2006). La géomorphologie s'inscrivant fortement dans le territoire, la représentation cartographique est particulièrement adaptée pour ces objectifs de description et d'explication. De nombreuses propositions méthodologiques pour la cartographie géomorphologique ont été présentées depuis plus d'un demi-siècle (par ex. Joly, 1962 ; Lee, 2001 ; Smith, Paron, et Griffiths, 2011). Traditionnellement dessinée sur le terrain à l'aide de crayons de couleur sur une carte topographique à grande échelle (par ex. 1 : 10 000 ou 1 : 25 000), la carte géomorphologique a été développée à des fins graphiques et qualitatives. Cela implique plusieurs étapes préalables qui passent notamment par le choix d'une classification des informations à représenter et de couleurs ou de figurés représentant ces informations mais également d'échelles adaptées, ce qui engendre une certaine simplification de l'information en fonction de la résolution (voir notamment Gustavsson, Kolstrup et Seijmonsbergen, 2006). Ces cartes sont très utiles pour identifier rapidement les éléments géomorphologiques mais sont difficilement déchiffrables pour les non initiés.

Si cet outil est une excellente base de travail, les cartes quantitatives sont de plus en plus appréciées. Ces cartes, qu'on décrira ici comme « cartes de la diversité abiotique » quantifient la diversité « non biologique », c'est-à-dire, notamment la géologie, la géomorphologie, les ressources, le relief, etc. Elles sont quantitatives car elles représentent des valeurs, contrairement aux cartes géologiques, géomorphologique et autres qui représentent des données qualitatives. Bien que moins complète, l'information est plus rapidement disponible (il y a moins de catégories représentées) et les données quantitatives permettent une plus grande interdisciplinarité (notamment pour une comparaison rapide avec des cartes de biodiversité ou entre différentes cartes de diversité abiotique).

Partant de ce constat, ce travail tente de transformer la carte géomorphologique réalisée au moyen de la légende de l'Université de Lausanne en carte de la diversité géomorphologique. Pour ce faire, il a fallu adapter la carte géomorphologique pour minimiser la généralisation cartographique. Effectivement, la légende géomorphologique a été créée pour une utilisation sur des cartes au format 1 : 10 000 et a ensuite régulièrement été utilisée sur des fonds de carte au format 1 : 25 000 ; la généralisation

cartographique est donc indispensable. Cette généralisation passe notamment par deux étapes ; tout d'abord par le choix d'une résolution minimale (par exemple 100m pour 1 : 10 000), ce qui mène à abandonner certains éléments de taille inférieure à cette résolution. Ensuite, par une simplification des tracés, par exemple certains éléments de petite taille, comme par exemple les rivières peu larges, qui doivent être représentées par des lignes plus épaisses que leur taille réelle pour être visibles une fois la carte imprimée ou encore des éléments ponctuels qui sont représentés par un point de taille fixe.

Cet article est divisé en deux parties. La première partie comprend une analyse comparative de cartes de la diversité abiotique. Ensuite, une proposition méthodologique pour la transformation de la carte géomorphologique selon la légende développée à Lausanne en carte de la diversité géomorphologique sera présentée.

CARTOGRAPHIE DE LA DIVERSITE ABIOTIQUE : ETAT DE LA RECHERCHE

Plusieurs tentatives de cartographie de la diversité abiotique⁶ ont déjà été menées dans le cadre de différentes études. Ci-après, le tableau 2 reprend les caractéristiques de quatorze études pour permettre leur comparaison. Les cartes sont également représentées dans les figures des pages suivantes.

Le choix s'est porté sur les quatorze études présentées ci-après car elles ont toutes été publiées dans des revues de référence et présentaient des cartes de la géodiversité accompagnées d'une explication de la méthodologie. Les études traitant de la géodiversité dans un sens de diversité des géomorphosites n'ont pas été prises en compte. Par contre, l'étude de Seijmonsbergen (Seijmonsbergen *et al.*, 2014) a tout de même été intégrée bien que les cartes traitent du « potentiel de géoconservation ». Ce choix a été fait suite à une discussion avec l'auteur qui considère que ces cartes sont des cartes de la géodiversité mais qui les a intitulées ainsi pour répondre aux attentes de l'éditeur.

⁶ Le terme de « diversité abiotique » (selon Duff, 1994) plutôt que géodiversité a été choisi pour prendre en compte les nombreux éléments abiotiques ayant été cartographiés. Cet usage permet également de ne pas confondre diversité géologique et géodiversité globale.

Les colonnes du tableau présentent les éléments suivants :

- La *référence* de l'étude, la source complète se trouvant dans la bibliographie à la fin de ce document.
- L'*étendue* de la région cartographiée en kilomètres carrés et le lieu.
- La colonne *grille*, où les options sont oui ou non, définit si la géodiversité a été calculée sur la base d'une grille. Dans ce cas, le nombre d'éléments par cellule de la grille est calculé et c'est cette valeur qui représente l'indice de diversité.
- La colonne suivante indique quels sont les *indices partiels* pris en compte dans le calcul, par ex. les éléments considérés comme représentant la géodiversité.
- Dans certains cas, les valeurs de diversité sont attribuées à une *unité d'analyse* plutôt qu'à chaque cellule d'une grille. Ces unités peuvent par exemple être des éléments géomorphologiques ou des frontières entre localités / entités géographiques.
- La *résolution* représente le degré de précision des éléments utilisés pour la carte de la géodiversité alors que la taille de la grille est la résolution de la grille d'analyse lorsque cette méthode est utilisée.
- La dixième colonne différencie les différentes *méthodes* (*directe, indirecte ou combinée*) selon la classification de Pellitero (Pellitero *et al.*, 2014). Les méthodes directes utilisent les classes de géodiversité comme les formes du terrain, le sol ou les roches. Les méthodes indirectes utilisent des indicateurs de substitution (ou *surrogate elements*) qui n'identifient pas les éléments intrinsèquement différents mais les environnements ou situations générant la diversité (cf. Pellitero *et al.*, 2014 : 3). Les méthodes indirectes sont généralement des méthodes morphométriques. Il existe également des études qui utilisent les deux méthodes (combinées).
- La colonne suivante concerne les études utilisant la méthode indirecte, les *éléments* utilisés y sont décrits.
- La colonne *représentation* décrit de quelle manière l'indice de géodiversité est représenté (valeurs par unité, par cellule ou isoligne).
- L'avant-dernière colonne, décrit la *légende*, qui est soit représentée par des valeurs numériques (indice de diversité par exemple) ou qualitatives (diversité faible à forte).
- La dernière colonne décrit les *formules* utilisées. Celles-ci sont la plupart du temps basées sur des formules développées dans le cadre d'études de biodiversité, notamment les indices de richesse ou de diversité de Shannon ou de Simpson (Shannon, 1948 ; Simpson, 1949).

Tableau 2:
Comparaison
d'études
présentant des
cartes de la
géodiversité

ID	Auteurs	Etendue	Lieu	grille	indices partiels	unités d'analyse	résolution	taille grille	Méthode	Elements indirects	Représentation	Légende	Formules
1	Pellitero <i>et al.</i> , 2010	0.45 km ²	Espagne	non	Géologie, géomorphologie, hydrologie, pédologie	Unités géomorphologiques et d'habitats	?	-	Combiné	Rugosité	valeurs par unités (géomorphologie et habitat)	Qualitatif	Indice de richesse (elimits par cellules)
2	Sejmonsbergen <i>et al.</i> , 2014	110, 90, ?, 10.5	Autriche, Liechtenstein	non	Importance scientifique, fréquence, vulnérabilité, destruction	Unités géomorphologiques	-	-	Directe	-	valeur par unités géomorphologiques	Qualitatif	Indice de richesse (elimits par unités)
3	Jaskulska <i>et al.</i> , 2013	64 km ²	Suisse	oui	Géologie, hydrologie	-	25 m	25m	Indirecte	Energie, fragmentation, préservation	valeurs par cellules	Qualitatif	Subjectif
4	Melli, 2014	72 km ²	Italie	oui	Géologie, géomorphologie, hydrologie	-	25m	?	Combiné	Rugosité	Nb éléments par cellule	Qualitatif	Richesse*1,ugosité / surface
5	Hjort et Luoto, 2010 et 2012	26, 110, 285, 362 km ²	Finlande	oui	Géologie, géomorphologie, hydrologie, pédologie	-	1m et plus	500m et 1km	Directe	-	valeurs par cellules	Valeur (nb éléments/cellule)	Indice de richesse (elimits par cellules)
6	Serrano, Ruiz Fiaño, 2007a ; Serrano <i>et al.</i> , 2009	450 km ²	Espagne	non	Géologie, géomorphologie, hydrologie, pédologie	Unités géomorphologiques	?	-	Combiné	Rugosité	valeur par unités géomorphologiques	Qualitatif	Richesse*1,ugosité / surface
7	Pellitero <i>et al.</i> , 2014	4 426 et 175 km ²	Brésil et Espagne	oui	Lithologie, structures, géomorphologie, hydrologie, fossiles, sols	-	11ha et 1ha	11ha et 1ha	Directe	pentés > 20°	Nb éléments par cellule	Valeur (nb éléments/cellule)	Indice de richesse (elimits par cellules)
8	Zwolinski et Stachowiack, 2012	1 000 km ²	Pologne	oui	Lithologie, grottes, hydrographie, sols, géoécologie	-	1ha	-	Combiné	Energie, fragmentation, préservation	Valeurs par cellules	Qualitatif	Subjectif
9	Comanescu et Nedela, 2012	1 098 km ²	Roumanie	non	Géologie, géomorphologie, hydrologie, pédologie	Unités administratives	?	1 ha	Directe	-	Nb éléments par cellule	Qualitatif	Indice de richesse (elimits par unités)
10	Zwolinski, 2010	18 000 km ²	Pologne	oui	-	-	1m, 25m	-	Indirecte	Energie, fragmentation, préservation	-	-	Subjectif
11	Pereira <i>et al.</i> , 2013	200 000 km ²	Brésil	oui	Géologie, géomorphologie, paléontologie, sols, présence de minéraux et sources	-	?	25 km	Directe	-	Carte isoligne	Qualitatif	Indice de richesse (elimits par cellules)
12	Benito-Calvo <i>et al.</i> , 2009	582 480 km ²	Espagne et Portugal	oui	Géologie	-	82 m	82 m	Combiné	Morphométrie, précipitations, températures	Intensité	Intensité	Diversité de Shannon, Simpson, richesse
13	Parks et Mulligan, 2010	1 000 000 km ²	Colombie	oui	Hydrologie, géologie, pédologie, (ressources pour le monde biotique)	-	1 km ²	1 km ²	Combiné	Exposition, pentes, climat (précipitations, ensoleillement)	intensité	Intensité	?
14	Silva <i>et al.</i> , 2013	env 19 000 000 km ²	Brésil	oui	Géologie, pédologie, géomorphologie (dont hydrographie), paléontologie, minéraux	-	1 : 25'000 1 : 500'000 – 1 : 600'000	13.8 km	Directe	-	Carte isoligne	Qualitatif	Indice de richesse (elimits par cellules)

Cartographie de la diversité géomorphologique

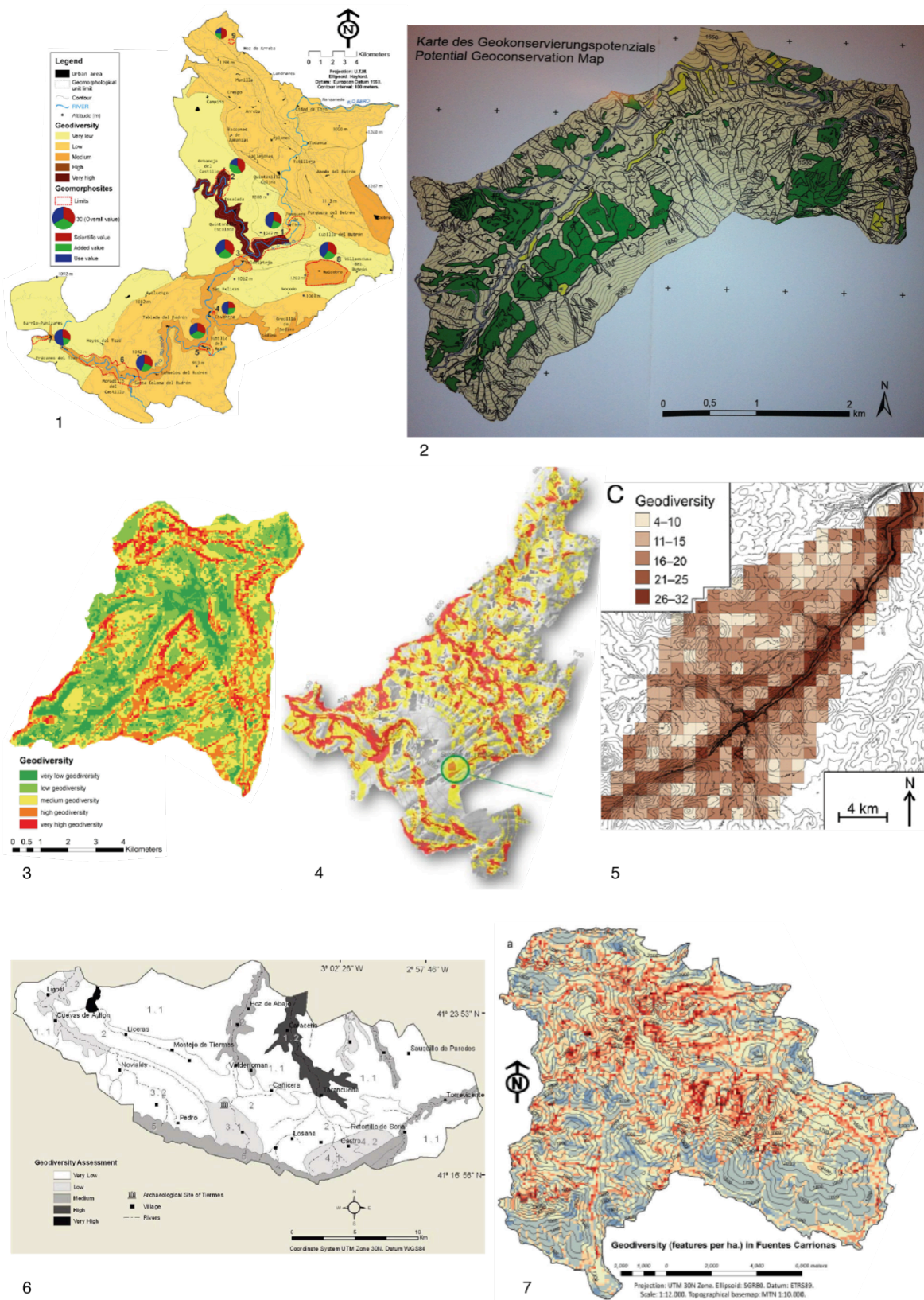


Figure 21 (1 à 7) : Exemples de cartes de géodiversité (les numéros renvoient au tableau 2).

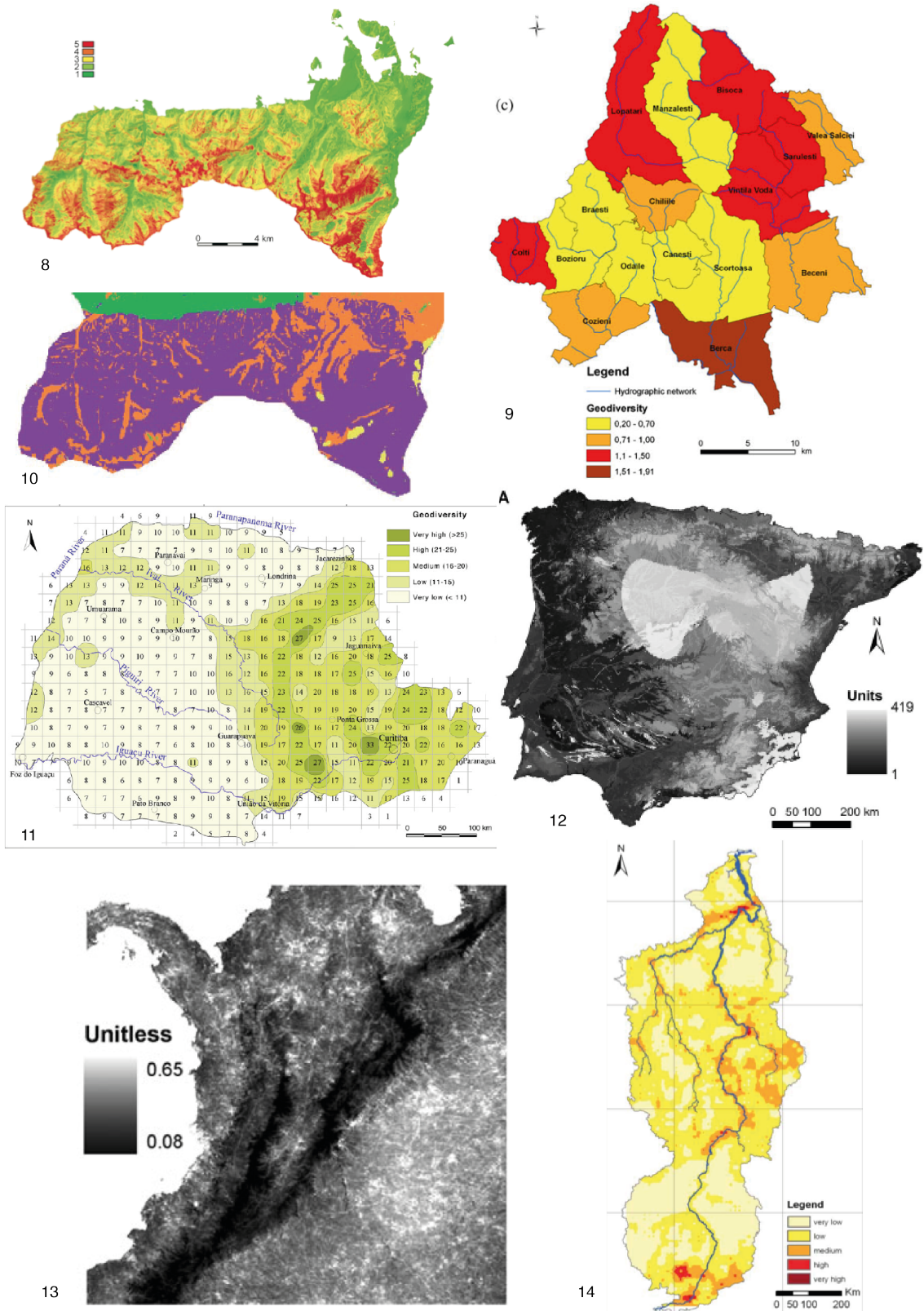


Figure 21 (8 à 14) : Exemples de cartes de géodiversité (les numéros renvoient au tableau 2).

En général, les méthodes de cartographie de la géodiversité peuvent être classées en fonction des auteurs dont elles s'inspirent. La méthode combinée de Serrano et Ruiz-Flaño (2007a), basée sur un indice de géodiversité prenant en compte la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie, la pédologie ainsi qu'un indice de rugosité a été reprise cinq fois (Comanescu et Nedela, 2012 ; Hjort et Luoto 2010 et 2012 ; Melelli, 2014 ; Pellitero *et al.*, 2010 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Serrano et Ruiz-Flaño, 2007a) avec quelques variations (par exemple Comanescu et Nedela (2012) n'ont pas calculé la rugosité car le terrain était très plat). La méthode morphométrique de Zwolinski a également été utilisée à plusieurs reprises (Jaskulska *et al.*, 2013 ; Zwolinski, 2010 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012). Cette méthode a été appliquée dans de nombreux cas, en particulier en Pologne et à des échelles très variables mais nous n'avons pas pris toutes les études en compte, un certain nombre n'étant d'ailleurs pas publiées en anglais. Une dernière méthode, utilisée par Pereira *et al.* (2013) et Silva *et al.* (2013) n'utilise que des éléments directs et le résultat est représenté sous forme d'isolignes.

Les différentes études ont été menées à des *échelles* variables : six à une échelle locale (Hjort et Luoto 2010 et 2012 ; Jaskulska *et al.*, 2013 ; Melelli, 2014 ; Pellitero *et al.*, 2010 et 2014), six à une échelle régionale (Comanescu et Nedela, 2012 ; Hjort et Luoto 2010 et 2012 ; Pellitero *et al.*, 2014 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Serrano et Ruiz Flaño, 2007 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012) et cinq à une échelle nationale (Benito-Calvo *et al.*, 2009 ; Parks et Mulligan, 2010 ; Pereira *et al.*, 2013 ; Silva *et al.*, 2013 ; Zwolinski, 2010). Il n'y a pas de lien entre les types de méthode et l'échelle de l'étude bien que cela pourrait se justifier. Effectivement, les méthodes directes demandent un long travail de terrain qui peut souvent se révéler trop onéreux d'où l'intérêt des méthodes basées sur des éléments de substitution (ou *surrogate elements*) comme la morphométrie (Pellitero *et al.*, 2014 : 3).

La majorité des études ont utilisé une *grille* pour le calcul de diversité (Benito-Calvo *et al.*, 2009 ; Hjort et Luoto 2010 et 2012 ; Jaskulska *et al.*, 2013 ; Melelli, 2014 ; Parks et Mulligan, 2010 ; Pellitero *et al.*, 2014 ; Pereira *et al.*, 2013 ; Silva *et al.*, 2013 ; Zwolinski, 2010 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012). Cinq études ont attribué une valeur de géodiversité à des unités d'analyse (Comanescu et Nedela, 2012 ; Pellitero *et al.*, 2010 ; Seijmonsbergen *et al.*, 2014 ; Serrano et Ruiz Flaño, 2007 ; Serrano *et al.*, 2009). Dans le cas de l'utilisation d'une grille, l'expertise scientifique (*expert knowledge*) intervient dans le

choix de la taille des cellules. Par contre, dans le cas d'unités d'analyse, qui sont souvent des géomorphosites, cette expertise intervient à l'amont puisque les valeurs de diversité sont attribuées à chaque unité et non pas de manière aléatoire. Dans les deux cas, un certain biais peut être induit mais il paraît encore plus important lors de l'utilisation d'unités d'analyse. Il faut également relever que cette seconde méthode peut corriger le problème lié aux limites entre éléments. Effectivement, lors de l'utilisation d'une grille et selon la taille des cellules il peut arriver que les zones de plus grande diversité se trouvent simplement aux frontières entre les éléments. Dans l'étude de Comanescu et Nedela (2012), les *unités d'analyse* sont les unités administratives. Cela paraît tout à fait incorrect car il est peu probable que la nature s'adapte à des frontières humaines.

En ce qui concerne la résolution des données et la taille de la grille utilisée, l'information est souvent difficile à trouver, voire inexistante.

Les méthodes utilisées sont *directes* dans six cas (Comanescu et Nedela, 2012 ; Hjort et Luoto 2010 et 2012 ; Pellitero *et al.*, 2014 ; Pereira *et al.*, 2013 ; Seijmonsbergen *et al.*, 2014 ; Silva *et al.*, 2013), *indirectes* dans deux cas (Jaskulska *et al.*, 2013 ; Zwolinski, 2010) et sept études combinent les deux méthodes (Benito-Calvo *et al.*, 2009 ; Melelli, 2014 ; Parks et Mulligan, 2010 ; Pellitero *et al.*, 2010 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Serrano et Ruiz Flaño, 2007 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012). Les éléments indirects pris en compte pour les études utilisant des méthodes indirectes ou combinées sont dans trois cas l'énergie, la fragmentation et la préservation du relief (Jaskulska *et al.*, 2013 ; Zwolinski, 2010 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012). Dans quatre autres cas la rugosité selon la méthode développée par Serrano et Ruiz-Flaño a été utilisée (Melelli, 2014 ; Pellitero *et al.*, 2010 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Serrano et Ruiz Flaño, 2007a). D'autres éléments utilisés sont notamment des facteurs climatiques (précipitations, températures ou exposition) et morphométriques (pentes...). Dans l'étude de Pellitero *et al.* (2014), les pentes de plus de 20 degrés ont également été prises en compte. Il est difficile de catégoriser cet élément comme étant direct ou non, on peut estimer que ce sont des zones particulières qui n'auraient pas été prises en compte dans d'autres éléments de la géodiversité ou alors qu'il s'agit d'un élément induisant de la géodiversité.

Les *légendes* utilisées sont généralement qualitatives, avec des valeurs de faible à forte diversité (dans dix cas : Comanescu et Nedela, 2012 ; Jaskulska *et al.*, 2013 ; Melelli, 2014 ; Pellitero *et al.*, 2010 ; Pereira *et al.*, 2013 ; Seijmonsbergen *et al.*, 2014 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Serrano et Ruiz Flaño, 2007 ; Silva *et al.*, 2013 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012).

Les *formules* utilisées pour le calcul de l'indice de géodiversité sont généralement des calculs de richesse, c'est-à-dire le nombre d'occurrences par cellule (cela impliquant l'utilisation d'une grille) ou par unité (Benito-Calvo *et al.*, 2009 ; Comanescu et Nedela, 2012 ; Hjort et Luoto 2010 et 2012 ; Melelli, 2014 ; Pellitero *et al.*, 2010 et 2014 ; Pereira *et al.*, 2013 ; Seijmonsbergen *et al.*, 2014 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Serrano et Ruiz Flaño, 2007a ; Silva *et al.*, 2013). Benito Calvo *et al.* (2009) ont testé plusieurs calculs dont les indices de Shannon (1948) et Simpson (1949). Ces indices permettent de prendre en compte la répartition des éléments au sein de l'unité considérée (voir Pellitero *et al.*, 2014 : 4). Trois études (Jaskulska *et al.*, 2013 ; Zwolinski, 2010 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012) se basent d'autre part sur des formules subjectives, telles que proposées par Zwolinski (2010 : 80, 82).

SYNTHESE

Les différentes méthodes de calcul de la géodiversité peuvent être généralement séparées en trois catégories selon leur source. La méthode de Serrano et Ruiz-Flaño (Université de Valladolid, Espagne), la méthode de Zwolinski (Université de Poznan, Pologne) et la méthode de Pereira (Université de Minho, Portugal). Les études diffèrent ensuite selon leur étendue et leurs objectifs mais l'idée principale reste toujours la même. Dans le cas de la méthode de Serrano et Ruiz-Flaño, des éléments directs sont combinés avec le facteur de rugosité et dans le cas de la méthode de Zwolinski, seuls des indices morphométriques sont utilisés. Quelques études ont totalement écarté les éléments indirects. Cette façon de faire est bien plus longue que lorsque seuls les éléments morphométriques sont considérés car, dans ce dernier cas, l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT) permet un travail complètement assisté par ordinateur. Cependant, il paraît erroné d'assimiler la géodiversité uniquement aux aspects

morphométriques⁷. Si ces méthodes permettent une plus grande rapidité, il ne faut pas perdre de vue le fait que les processus et dynamiques du relief devraient également être pris en compte dans le calcul de diversité. D'autre part, les méthodes morphométriques se basent sur des formules subjectives, où l'on attribue des valeurs aux différents éléments. Ainsi, les fonds de vallées se voient souvent attribuer un facteur de diversité faible, alors que les reliefs de haute montagne sont considérés comme ayant une diversité élevée (cf. Zwolinski, 2010 : 80). Ces méthodes sont donc très dépendantes de l'avis du scientifique bien que considérées comme totalement quantitatives.

L'utilisation d'une grille pour le calcul de la richesse des éléments paraît tout à fait appropriée, cette façon de faire a d'ailleurs déjà fait ses preuves dans un grand nombre d'études sur la biodiversité. Toutefois, cette méthode est dépendante de l'échelle utilisée. Les questions d'échelle et de résolution se retrouvent déjà au début du processus, lors de la sélection des données. Leur résolution influencera grandement le résultat. Par la suite, le choix d'une taille de cellule est également un grand enjeu. En général, la résolution des données et la taille de la grille doivent être adaptées à l'échelle de l'étude. Ainsi, pour une étude de la taille d'un continent, on ne choisira pas a priori des données à des échelles locales, l'inverse étant également vrai.

À partir de cette analyse comparée, trois grandes écoles ont pu être différenciées, bien que les études soient très variées dans les détails. Chacune à leur manière décrit des caractéristiques de la surface terrestre. Ces études ont souvent un caractère normatif, décrivant de manière qualitative les portions de territoire comme présentant une « faible ou forte diversité ». Il ne faudrait tout de même pas trop s'attacher à ces qualificatifs et enfermer tel ou tel élément dans une catégorie, la diversité devant rester un outil de description du paysage sans attribuer de valeurs.

⁷ Cette question a été débattue lors de la séance thématique sur la géodiversité et les géopatrimoine à l'occasion de la dernière assemblée de l'EGU (European Geosciences Union) à Vienne (avril 2015). De l'avis général, il faudrait préciser lorsque la géodiversité est uniquement morphométrique.

PROPOSITION METHODOLOGIQUE

L'étude présentée dans cet article s'inspire des différents travaux présentés ci-dessus mais calcule uniquement la diversité géomorphologique⁸. Elle est réalisée à une échelle locale (53 km²) et utilise une méthode directe avec l'utilisation d'une grille pour calculer la richesse des éléments géomorphologiques. La carte de la diversité géomorphologique est obtenue à partir d'une carte géomorphologique construite à l'aide de la légende développée à l'Université de Lausanne à une échelle de 1 : 25 000. Cette carte a une précision d'environ 100 mètres. La classification des éléments géomorphologiques est directement obtenue à partir de la légende géomorphologique qui différencie les éléments selon leur morphogénèse. Toutefois, cette légende ayant été développée à des fins graphiques, plusieurs éléments ont dû être modifiés pour minimiser la simplification des entités et obtenir une carte facilement transformable en raster. Ces différentes opérations seront commentées ci-après, à la suite d'une brève présentation de la légende géomorphologique de l'Université de Lausanne.

La légende géomorphologique de l'Université de Lausanne a été utilisée depuis plus de 20 ans (Lambiel *et al.*, 2015 : 5). Développée, dans un premier temps, pour la cartographie sur le terrain avec comme support des cartes à grande échelle (généralement au 1 : 10 000) ou les cartes topographiques de Swisstopo au 1 : 25 000, la légende a ensuite été modifiée pour la cartographie assistée par ordinateur, tout d'abord à l'aide d'un logiciel de dessin (Adobe Illustrator) puis d'un système d'information géographique (ArcGIS). La dernière version (Maillard *et al.*, 2011 ; Lambiel *et al.*, 2015), développée pour ArcGIS 10.00, est divisée en trois catégories qui sont des éléments ponctuels, linéaires et surfaciques. Les informations contenues dans les cartes géomorphologiques de l'Université de Lausanne sont les processus et les formes présentes sur le terrain. Ce sont donc des cartes morphogénétiques. Les couleurs représentent les processus ; les zones d'accumulation ont une couleur de fond alors que les zones d'érosion sont laissées en blanc, les symboles sont la plupart du temps de la même couleur mais d'une intensité plus forte et représentent les différentes formes (voir notamment Schoeneich, 1993 a et b ; Schoeneich, Reynard et Pierrehumbert, 1998).

⁸ Le choix de limiter le travail à la diversité géomorphologique a été fait pour des raisons de temps, ce travail s'inscrivant dans un mémoire de master.

Contrairement à d'autres cartes géomorphologiques, la morphologie, les pentes et les lithologies ne sont pas représentées. Il est considéré que le fond de carte, les cartes topographiques nationales au 1 : 25 000 rendent suffisamment l'effet de la topographie et que les informations quant à la lithologie sont disponibles sur les cartes géologiques.

Cette légende a été utilisée pour cartographier la région de Derborence et la vallée de la Lizerne, dans les Alpes suisses⁹. La carte obtenue a par la suite été transformée pour obtenir une carte de la diversité géomorphologique. Le processus complet est présenté à la figure 22, ci-après.

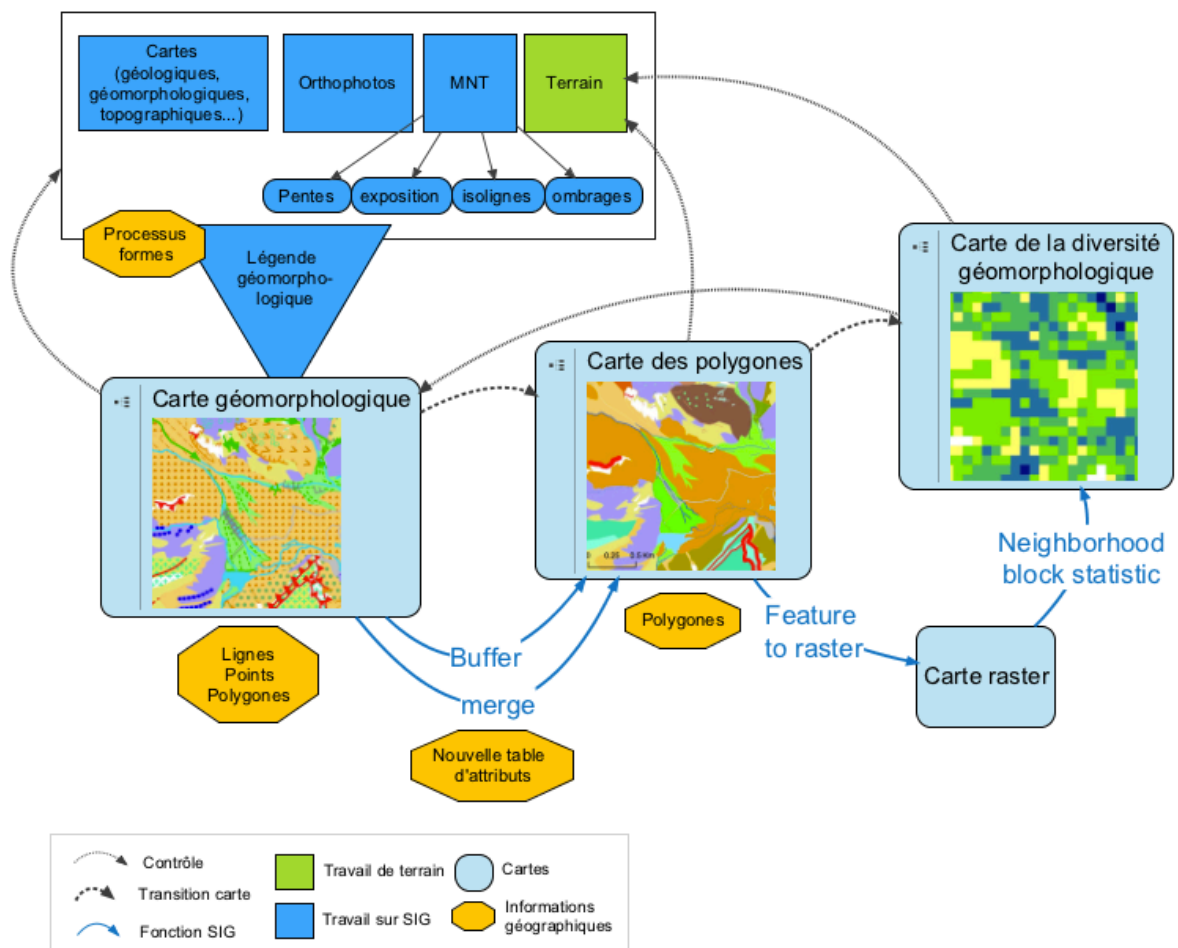


Figure 22 : Méthode de travail

La carte géomorphologique étant principalement développée à des fins graphiques, il a fallu la transformer pour minimiser la généralisation cartographique et l'adapter à une

⁹ Cette carte a été décrite dans le premier article de ce mémoire (p. 17)

utilisation comme carte raster avant d'en faire une carte de la diversité géomorphologique. La première étape consiste à transformer les éléments ne correspondant pas à des entités surfaciques sur la carte géomorphologique de base, à savoir les lignes et les points, qui sont ainsi remplacés par des polygones. L'outil *buffer*, du logiciel ArcGis permet de « grossir » des éléments à la taille souhaitée.

Trois options ont été choisies. Pour une première série d'éléments, nous avons choisi une taille correspondant à leur emprise réelle au sol. C'est le cas des rivières (cf. fig. 23), gorges et dolines. Chaque tronçon ou élément individuel a donc été analysé à l'aide des photographies aériennes ou des MNT afin de déterminer leur taille exacte et les lignes ou points ont été transformés en polygones par un élargissement.

Pour un deuxième groupe, la taille choisie est également variable selon leur emprise au sol mais ne correspond pas exactement au terrain. C'est le cas des escarpements, cirques glaciaires et verrous. L'enjeu pour ces dernières entités est que ce sont des formes d'érosion, généralement figurées en blanc (sans données) mais marquant tout de même une caractéristique géomorphologique. Le trait a ainsi été grossi selon la taille de l'élément pour différencier l'importance relative de chacun mais la surface ne correspond pas à la délimitation exacte sur le terrain.

Finalement, une taille précise, non variable selon la taille de l'élément au sol a été attribuée aux éléments suivants car ils ne variaient pas fortement d'une entité à l'autre :

- Cordons morainiques: 2 m (l'accumulation morainique en elle même est déjà cartographiée sous la forme d'un polygone ; le haut de la crête (forme du terrain) est simplement marqué par un polygone de deux mètres de large)
- Couloirs d'éboulis et ravins: 2 m (ils sont généralement étroits)
- Talus de remblais : 6 m (taille approximative ; lorsqu'ils sont plus grands, on utilise le figuré « surface d'accumulation anthropique »)
- Niches d'arrachement et niches d'arrachement torrentielles: 5 m (taille approximative, même problème que plus haut, ce sont des formes d'érosion) (cf. fig. 23)

- Rebord d'érosion: 7 m (comme pour les niches mais ils sont généralement de plus grande taille)

Ce choix d'une taille fixe par catégorie a été motivé par le fait qu'il permettait un travail plus automatisé.

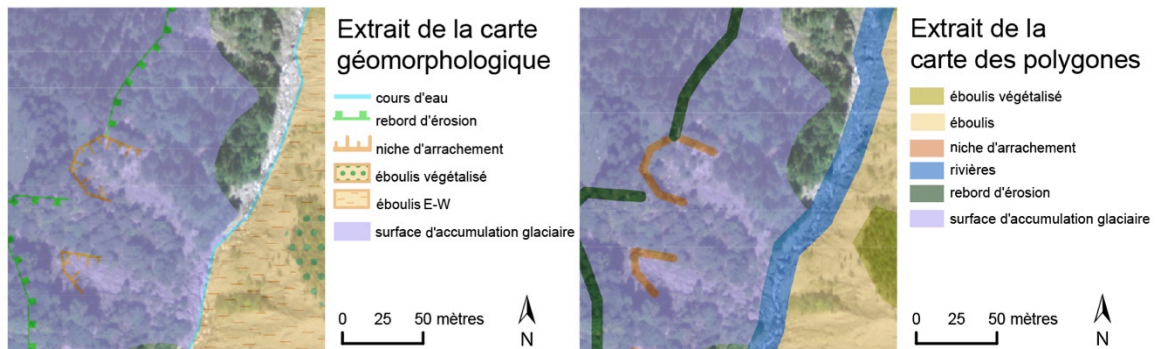


Figure 23 : Détails de la carte géomorphologique et de la carte des polygones. On observe l'élargissement de la rivière ainsi que des niches d'arrachement et des rebords d'érosion. La rivière correspond à l'emprise exacte de l'élément représenté, ce qui n'est pas le cas pour les niches (5 m de largeur) et les rebords d'érosion (7 m de largeur).

Pour ce travail de transformation des différents éléments linéaires et ponctuels en polygones, il a fallu créer de nouvelles catégories de polygones pour ceux qui n'existaient pas dans la table d'attributs (par exemple les niches d'arrachements, rivières, rebords d'érosion, dolines, etc.). Les failles qui figuraient sur la première carte ont simplement été supprimées car ce sont des éléments géologiques et non pas géomorphologiques et les éboulis, différenciés selon leur orientation (par exemple E-W, N-S, NW-SE etc.), ont tous été rassemblés sous le nom « éboulis ». D'autre part, les différents figurés associés aux éléments surfaciques (par exemple les points verts pour les éboulis végétalisés) ont également été supprimés afin d'éviter tout problème lors de la rasterisation.

Pour terminer cette étape, les différentes entités ont été unies. Ainsi, au lieu d'avoir une quantité d'unités différentes nommées « rivières », une seule et même unité a été créée, faite de plusieurs polygones. La table attributaire liée aux cartes est ainsi passée de 1472 attributs à seulement 41. Ce travail était indispensable pour la transformation de la carte des polygones en carte raster. La carte des polygones a, par la suite, été transformée à l'aide de l'outil de conversion « entité vers raster » (*feature to raster*), avec une résolution de 5 mètres, pour une précision maximale.

La dernière étape, à savoir la création de la carte de la diversité géomorphologique, a été conduite à l'aide du filtre de « statistique par bloc » (*block statistics*) dans le jeu d'outil *voisinage*. Cet outil permet d'agréger les données par cellules. L'analyse consiste à calculer le nombre de valeurs uniques (ou nombre d'éléments différents) par cellule. Ce nombre est ensuite attribué à l'ensemble de la cellule. La figure 24 détaille ce calcul pour 16 cellules de 100 m x 100 m.



Figure 24 : Passage de la carte raster à la carte de la diversité géomorphologique par décompte du nombre d'éléments uniques par cellule de 100 m x 100 m.

Pour obtenir le résultat de la carte de la diversité géomorphologique, il a également fallu faire un choix quant à la taille des cellules de sortie. La figure 25 présente les tests pour trois tailles de cellules différentes.

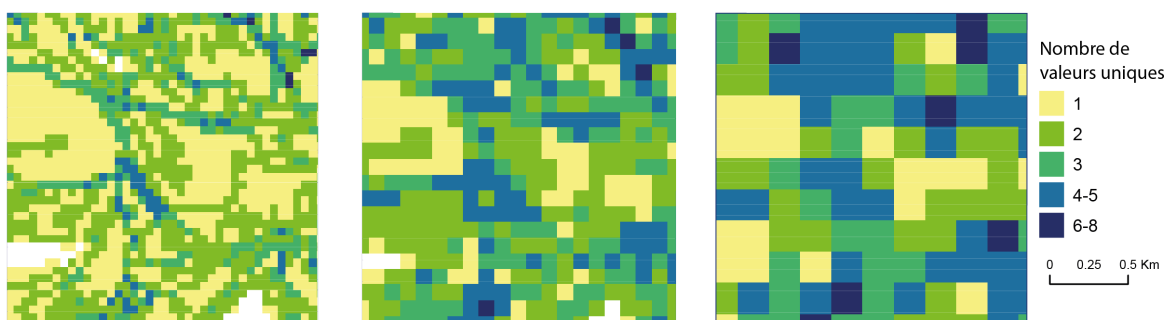


Figure 25: Essais de cartes de la diversité avec des cellules de 50, 100 et 200 m de côté.

Le choix de la taille de cellule de 100 m x 100 m a été fait suite à différents tests. Avec des cellules de plus petite taille, les zones présentant une diversité élevée suivent

simplement les limites entre éléments géomorphologiques. Quant aux cellules de plus grande taille (200 m), le rendu accuse une grande perte d'informations. L'avantage de la carte obtenue avec des cellules de 100 m de côté est, d'autre part, que des agrégations de zones de forte diversité se dessinent.

Dans une prochaine étape, qui sera détaillée dans l'article suivant, la carte a été comparée aux réalités du terrain afin de confronter les données obtenues aux connaissances et représentations scientifiques.

RESULTATS

Le résultat de ce travail est constitué des trois cartes disponibles en annexe : la carte géomorphologique selon la légende de l'Université de Lausanne, la carte géomorphologique transformée en entités surfaciques uniquement et enfin la carte de la diversité géomorphologique. Ci-après sont présentés des extraits des trois cartes dans la région du cirque de Derborence (fig. 26 à 28).

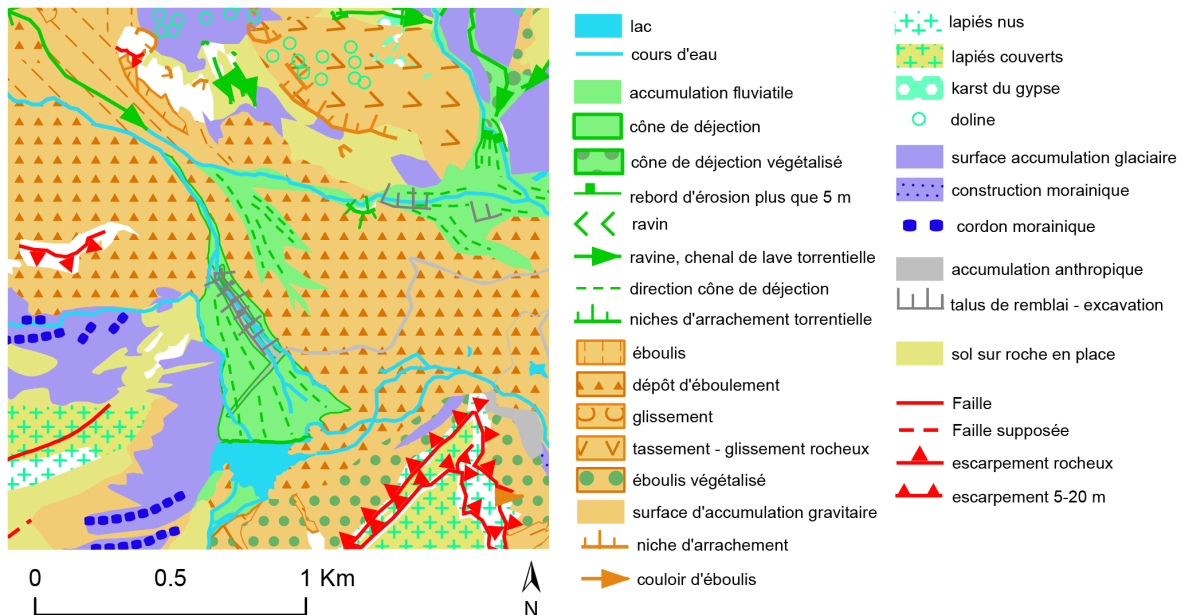


Figure 26 : Extrait de la carte géomorphologique.

Cartographie de la diversité géomorphologique

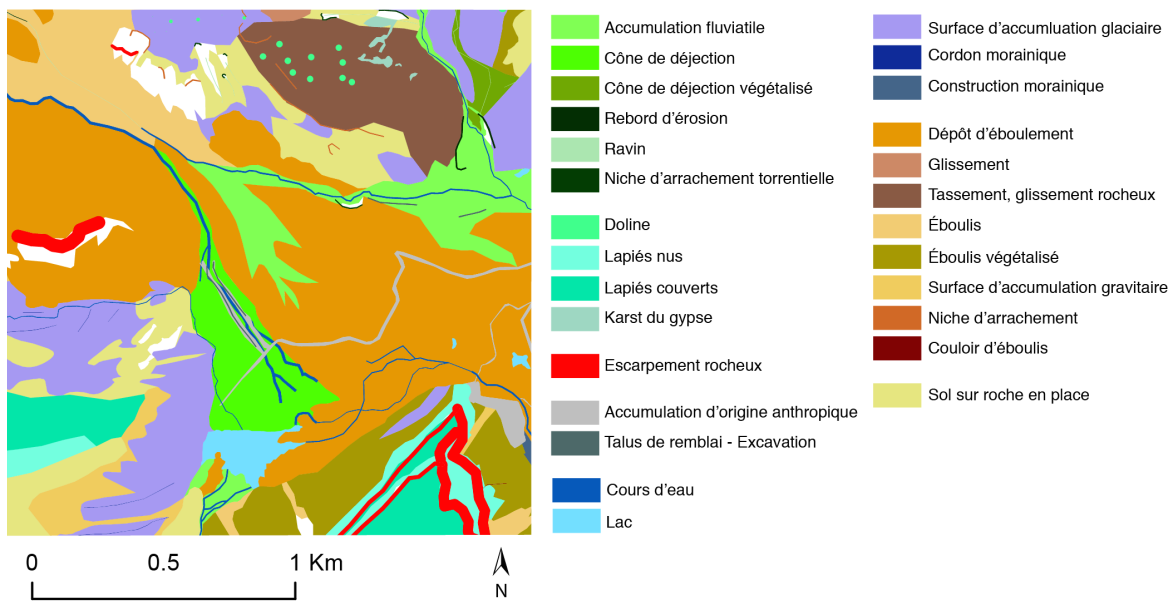


Figure 27 : Extrait de la carte des surfaces.

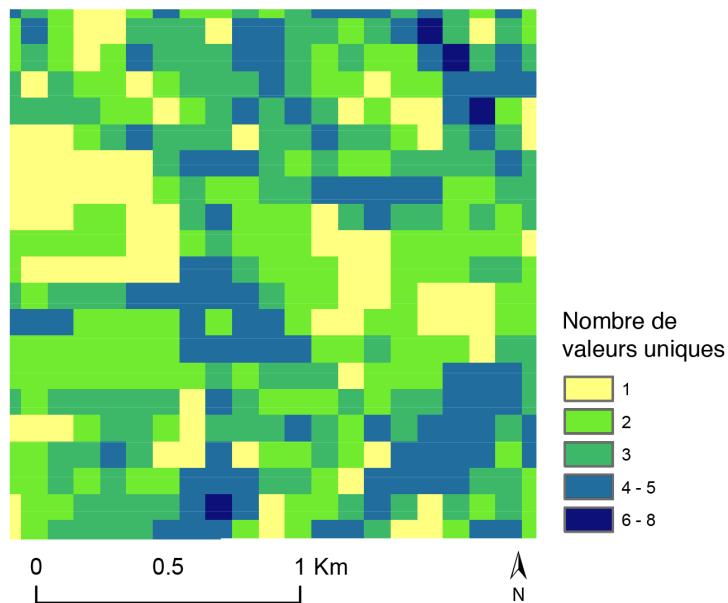


Figure 28 : Extrait de la carte de la diversité géomorphologique.

La première carte a été décrite dans le premier article de ce travail alors que la dernière carte sera analysée et comparée au terrain dans le dernier article. La méthode présentée ici est très satisfaisante au vu du résultat de la dernière carte et du déroulement du travail. Elle permet une certaine automatisation tout en restant au plus près des réalités du terrain ; elle sera donc facilement réutilisable dans d'autres contextes. L'enjeu du travail

réside dans le choix lors de la transformation des éléments linéaires et ponctuels en surfaces. Il faut que le résultat soit le plus proche de la réalité sans que cela ne prenne trop de temps. Il faut donc, parfois, choisir des tailles semblables pour tous les éléments d'une même catégorie bien que ceux-ci diffèrent un peu selon les endroits. Le choix de la taille des cellules ainsi que la mise en classes pour la carte de la diversité est un second enjeu important où, encore une fois, l'avis du chercheur intervient.

DISCUSSION

L'avantage de la méthode présentée ici est la proposition d'utiliser les cartes géomorphologiques existantes. Cela permet d'utiliser une catégorisation des éléments pré-existante. L'inconvénient des géosciences face aux biosciences est que le monde vivant a été classifié de manière systématique, ce qui n'a pas été fait de manière aussi poussée pour le monde abiotique. Alors que le monde vivant a été classé par rangs de taxons du type règne – embranchement – classe – ordre – famille – genre – espèce, ce type de classification est inexistant pour le monde abiotique. Cette étape de classification est pourtant indispensable avant tout calcul de diversité. Pour remédier à cet inconvénient et au lieu d'utiliser des indicateurs de substitution, la méthode présentée dans ce travail se base sur les catégories créées pour les cartes géomorphologiques. Cette façon de faire présente l'atout de proposer une classification valable et de réutiliser des travaux existants.

L'inconvénient est le temps qu'il faut pour cartographier, dans un premier temps, puis transformer la carte géomorphologique en carte de polygones. Peut-être la solution résiderait dans le fait de cartographier directement de manière à avoir uniquement des polygones mais il est clair que la seconde carte est bien moins lisible et compréhensible que la première, les symboles et autres attributs graphiques étant supprimés. Il est également possible d'utiliser uniquement les modèles numériques de terrain pour créer des cartes basées sur la morphométrie mais la géomorphologie est tout de même très dépendante du regard humain, de ce que nous estimons, en tant que géomorphologues, comme ayant une valeur géomorphologique. Si le MNT sait distinguer un terrain avec des dépressions, il ne pourra pas pour autant différencier des dépressions situées sur un glacier rocheux fossile de dolines. La carte géomorphologique permet d'attribuer les

processus en cause dans la formation des formes du relief. Les études morphométriques ne prennent quant à elle pas en compte les processus ni la genèse des formes. La diversité du relief sans considérer les dynamiques en cause dans ce relief est simplement quantifiée.

Si le fait de transformer la carte géomorphologique en carte de la diversité géomorphologique accuse une grande perte d'informations, une nouvelle information, quantitative, apparaît. Celle-ci présente l'avantage d'être facilement compréhensible par les non-spécialistes car aucun terme scientifique ne doit être connu. De plus, ces données peuvent plus aisément être récoltées pour une utilisation dans des calculs ou pour des comparaisons avec d'autres cartes de diversité naturelle (diversité géologique ou biodiversité par exemple).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail a permis le développement d'une méthode de passage de la carte géomorphologique selon la légende de l'Université de Lausanne à une carte de la diversité géomorphologique. Ce processus transforme une carte qualitative contenant un grand nombre d'informations, en carte quantitative indiquant simplement les zones de plus faible ou forte diversité.

La carte de la diversité géomorphologique pourra ensuite être combinée avec les cartes de la diversité géologique, pédologique, tectonique etc. pour obtenir une carte complète de la géodiversité. Ensuite, il sera intéressant de comparer avec les données des cartes de biodiversité. Non pas pour tirer des parallèles entre elles et qu'elles se ressemblent totalement, dans ce cas ce travail serait totalement inutile, mais pour observer aussi leurs différences.

Avec ce résultat, une prochaine étape est d'analyser de quelle manière cette carte peut être utilisable sur le terrain et quelles informations elle peut apporter. Cette analyse est le sujet de l'article suivant.

Diversité géomorphologique : Etude de cas.

Derborence et la vallée de la Lizerne (Valais, Suisse)

Hélène Maret

Institut de géographie et durabilité,
Université de Lausanne
helene.maret@unil.ch

Résumé

Cet article présente les résultats d'une analyse quantitative de la diversité géomorphologique à Derborence. Cette analyse a été faite à l'aide d'une carte de la diversité créée à l'aide d'une nouvelle méthode de transformation d'une carte géomorphologique selon la légende de l'Université de Lausanne en carte de la diversité géomorphologique. Plusieurs périmètres présentant de fortes valeurs de diversité ont été délimités et chacun est décrit de manière qualitative. Ce travail permet de mettre en lumière les facteurs à l'origine de la diversité géomorphologique.

Abstract

This paper presents the results of a quantitative analysis of the geomorphological diversity in Derborence. This analysis is based on a geomorphological diversity map, derived from a morphogenetic geomorphological map, created with the legend of the University of Lausanne. Several areas with high diversity values were delimited and described qualitatively. This work permits us to reveal the factors that induce a high geomorphological diversity.

INTRODUCTION

La biodiversité est un terme entré dans le langage commun bien que son calcul repose sur des bases scientifiques. Le concept d'une nature pouvant être mesurée, et dont la « diversité » peut être évaluée, est aujourd'hui largement admis. La diversité de la nature est dès lors considérée comme une valeur, un objectif à atteindre ou à maintenir. Cet état de fait se vérifie pour ce qui est des aspects biologiques de la nature alors que le domaine abiotique est souvent oublié ou simplement réduit à la notion d'habitat. Les études traitant de la géodiversité sont relativement rares mais on observe un intérêt croissant pour cette

thématique dans le monde des géosciences. Effectivement, le fait de mesurer et d'évaluer les composants de la nature est devenu une nouvelle préoccupation des chercheurs après les traditionnelles activités qui sont la description et l'explication de ceux-ci. Cela s'explique notamment par le fait que les données quantitatives, par opposition aux données qualitatives, sont toujours plus valorisées et utilisées pour communiquer les informations de manière simple.

Derborence est un lieu d'importance au niveau de la protection de la nature (Kuonen, 2000 ; Rey Carron et Rey, 2014). L'ensemble de la zone étudiée dans le cadre de ce travail est classé comme « paysage d'importance nationale » à l'Inventaire fédéral des paysages, sites et monuments naturels d'importance nationale (IFP). Le périmètre est également classé comme « district franc fédéral » qui vise la protection de la diversité des espèces et des habitats (Office fédéral de l'environnement, 2014). La protection est intégrale, ce qui signifie que la chasse y est interdite et les mesures de régulation ne peuvent être prises que dans des cas exceptionnels. Plusieurs zones comprises dans la région d'étude ont été classées d'importance nationale (fig. 29). La forêt vierge de Derborence est notamment protégée de manière intégrale et est étudiée de près par des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ) (pour plus de détails voir Rey *et al.*, 2014 ainsi que Kuonen, 2000). La zone de l'éboulement de Derborence a d'autre part été classée comme géotope d'importance nationale (Reynard *et al.*, 2012).

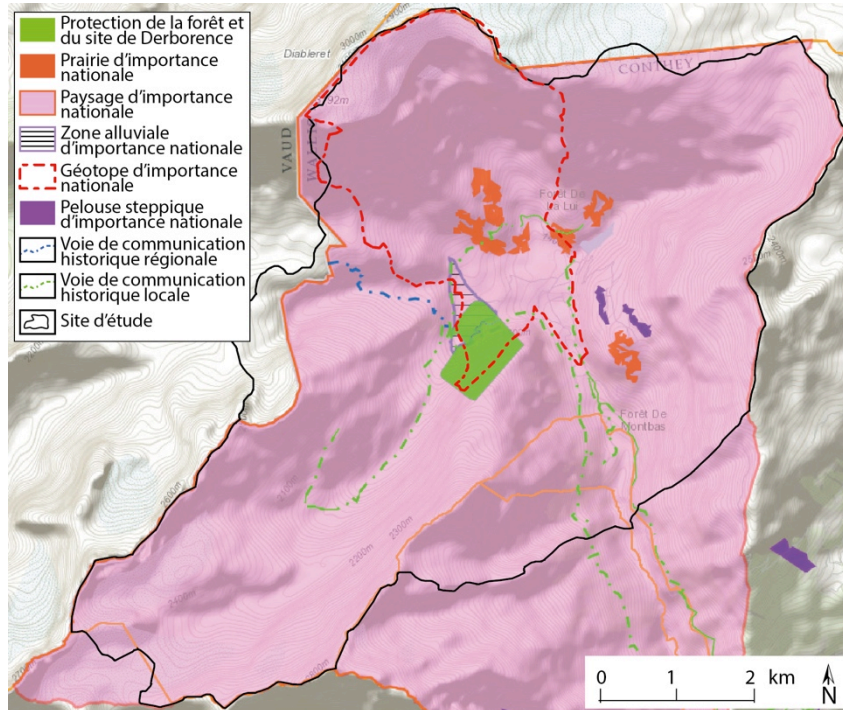


Figure 29 : Zones de protection de la nature dans la région étudiée. Source : Etat du Valais (géoportail) et Swisstopo.

On peut estimer, a priori, que cette région jouit d'une forte diversité naturelle. De nombreuses sources ont d'ailleurs commenté la richesse et la diversité de la flore, de la faune et des milieux (Droz, 1989, 1992 ; Kuonen, 2000 ; Rey-Carron et Rey, 2014).

ÉTAT DE LA RECHERCHE

L'évaluation de la diversité abiotique est une pratique relativement nouvelle et encore peu répandue. La géodiversité est très souvent apparentée aux géotopes. « Les géotopes sont des objets géologiques ou géomorphologiques qui présentent une valeur scientifique intéressante pour la compréhension de l'histoire de la Terre, des espèces et du climat » (Grandgirard, 1999). Ces sites peuvent être caractérisés comme tels dès le moment où une certaine valeur (scientifique, écologique, culturelle ou esthétique, etc.) leur est attribuée. La géodiversité ne peut pourtant pas être considérée comme un synonyme de cette notion. Les objets géologiques ou géomorphologiques ainsi que toute portion de la géosphère peuvent être définis selon leur diversité mais cela n'est pas intrinsèquement lié à la valeur qu'on leur attribue. La valeur est effectivement fortement dépendante du

regard humain. Il en est de même pour la diversité géomorphologique qui est confondue avec les géomorphosites (Pellitero *et al.*, 2014). En Suisse, de nombreux travaux ont été menés pour l'évaluation des géotopes (Grandgirard, 1999, Académie suisse des sciences naturelles, 1999 ; Reynard *et al.*, 2012 ; Reynard, 2012). Par contre, la diversité abiotique n'a pratiquement pas été abordée. Une étude préliminaire d'évaluation de la géodiversité a été menée dans les Alpes valaisannes, à Derborence et l'Ilgraben (Jaskulska *et al.*, 2013). Ailleurs, quelques travaux ayant permis une évaluation de la géodiversité peuvent être mentionnés notamment ceux de Comănescu et Nedela, 2012 ; Hjort et Luoto 2010 et 2012 ; Năstase *et al.*, 2012 ; Pellitero *et al.*, 2010 et 2014 ; Pereira *et al.*, 2012 ; Serrano et Ruiz Flaño, 2007 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Zwolinski 2010 ; Zwolinski et Stachowiak, 2012. À Derborence, l'évaluation de la nature a été faite de manière principalement qualitative. De nombreux ouvrages et articles traitant de la nature à Derborence ont été publiés dont Droz 1989 et 1992 ; Farquet et Mariétan 1929 ; Kuonen, 2000 ; Mariétan, 1960 ; Rey-Carron et Rey 2014.

PROBLEMATIQUE

Dans le cadre d'un mémoire de master (Maret, 2015), une méthode a été développée pour transformer une carte géomorphologique (descriptive et qualitative) en carte de la diversité géomorphologique (quantitative) (Article 2). La région de Derborence – vallée de la Lizerne a été choisie pour la création de ces deux cartes. Le site d'étude s'étend sur environ 53 km². Derborence est connue pour son importance au niveau de la protection de la nature et pour sa grande diversité de milieux. Les caractéristiques tectoniques et géologiques de la région en font également un site d'importance pour les géosciences. Un autre atout important est son caractère plutôt préservé de toute action humaine.

L'objet de cet article est de distinguer les zones d'importance au niveau de la géomorphologie à Derborence à l'aide de la carte de la diversité géomorphologique.

La méthode de calcul de l'indice de diversité géomorphologique sera tout d'abord présentée. La carte géomorphologique puis la carte de la diversité seront analysées de

manière quantitative. Finalement, quelques zones de plus forte diversité seront choisies pour une analyse approfondie.

METHODE

Ce travail a débuté par la création d'une carte géomorphologique selon la légende géomorphologique de l'Université de Lausanne (article 1 ; Maret et Reynard, 2015). Cette carte, qualitative et créée à des fins graphiques, a été transformée en carte constituée uniquement de surfaces d'une étendue au plus près de la réalité. C'est cette carte intermédiaire qui a ensuite servi de base pour le calcul de diversité.

L'indice de diversité géomorphologique développé dans cette étude est un indice de richesse. Le nombre d'éléments différents par unités de surface est simplement compté, comme on le ferait pour une étude floristique. Le calcul a été fait à l'aide du système d'information géographique ArcGIS. L'outil statistique de voisinage par blocs dans la boîte à outil *analyse spatiale* a été utilisé. Cet outil signifie que les voisinages des emplacements ne se superposent pas, chaque cellule dans le rectangle d'emprise minimale qui contient le voisinage reçoit ainsi la même valeur en sortie (fig. 30). Dans le cas précis, la carte géomorphologique transformée en carte de surfaces a été transformée en raster d'une résolution de 5m. Les cellules de 5m de côté ont ensuite été agrégées en unités de 100m de côté.

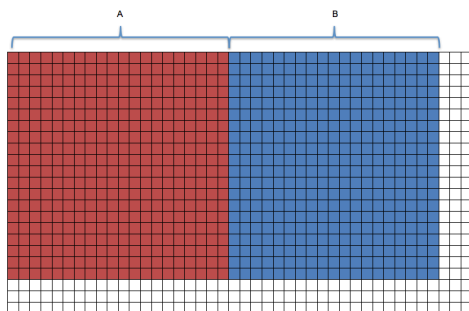


Figure 30 : Fonctionnement de l'analyse par bloc.

La statistique « variété » détermine le nombre de valeurs uniques du voisinage. En sortie, chaque cellule obtient la valeur du nombre d'éléments uniques qu'elle contient. Dans chaque carré de 100m x 100m, le nombre d'éléments différents a ainsi été comptabilisé et ce chiffre est attribué à l'ensemble du carré (fig. 31). Les valeurs varient de 1 à 8.



Figure 31 : La statistique variété calcule le nombre de valeurs uniques par cellules de 100m x 100m.

La méthode de mise en classes choisie est la mise en classe par seuil naturel de Jenks. Les valeurs ont été réparties en cinq classes. Le plus grand nombre de valeurs se trouvant dans les classes 1 à 3, les classes 4 et 5 et 6 à 8 ont été agrégées. Les cellules contenant le moins d'éléments différents ont une valeur plus faible et peuvent être considérées comme de « faible diversité ».

LA DIVERSITE GEOMORPHOLOGIQUE A DERBORENCE

Afin d'analyser la diversité géomorphologique à Derborence, l'emprise des différentes entités des cartes obtenues a été calculée selon les processus à leur origine. Pour la première carte, basée sur la légende développée à l'Université de Lausanne, les entités sont surfaciques, linéaires et ponctuelles alors que la carte des polygones contient uniquement des entités surfaciques. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 3 et la figure 32, ci-après.

Tableau 3 : Répartition des surfaces par processus pour les entités de la carte géomorphologique et de la carte des polygones.

Carte géomorphologique				Carte des polygones	
Processus	Longueur (lignes)	Surfaces	Nombre (points)	Surfaces	Parts
Anthropique	902 m	0.10 km ²		0.10 km ²	0.28%
Périglacière	-	0.15 km ²		0.15 km ²	0.43%
Hydrographique	38'567 m	0.15 km ²		0.37 km ²	1%
Fluviatile	27'583 m	1.26 km ²		1.21 km ²	3%
Formes structurales	99'056 m	-		2.03 km ²	6%
Karstique	-	6.15 km ²	68	5.87 km ²	17%
Glaciaire	14'696 m	5.29 km ²		5.90 v	17%
Sol sur roche en place	-	6.91 km ²		6.72 km ²	19%
Gravitaire	11'512 m	10.52 km ²		12.75 km ²	36%
Total	192'315 m	20.02 km²	68	35.09 km²	

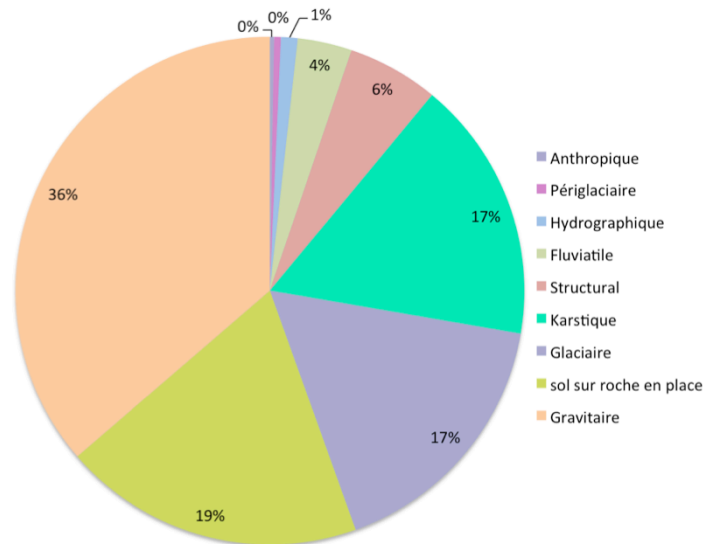


Figure 32 : Répartition des surfaces de la carte des polygones par processus

Cette analyse permet de dégager les grandes tendances morphogénétiques dans la région étudiée. Plus d'un tiers des surfaces (36%) est concerné par des processus gravitaires. 19% des surfaces sont des zones végétalisées recouvrant la roche en place

sur une faible profondeur, 17% sont des zones d'accumulation glaciaire et 17% sont affectés par des processus karstiques. Les autres domaines (structural, fluvatile, hydrographique, périglaciaire et anthropique) représentent un peu plus de 10% de la surface. Les principaux processus sont donc gravitaires, glaciaires et karstiques. Il faut signaler que les formes structurales, très présentes dans la première carte comprennent les failles et les escarpements rocheux. Les failles ont ensuite été supprimées pour le calcul de diversité ; c'est pourquoi la surface dédiée aux formes structurales est bien moins importante dans la carte des polygones. Ce choix a été motivé du fait que les failles ne devaient pas être calculées pour la diversité géomorphologique, puisqu'elles sont, avant tout, des formes géologiques. De plus, les escarpements rocheux ne sont pas entièrement représentés car la carte géomorphologique est prévue pour laisser les zones d'érosion sans couleur. D'autre part, les processus fluvatiles, représentant 3% de la surface, sont plus précisément torrentiels (cônes de déjection, surfaces d'accumulation et chenaux de laves torrentielles).

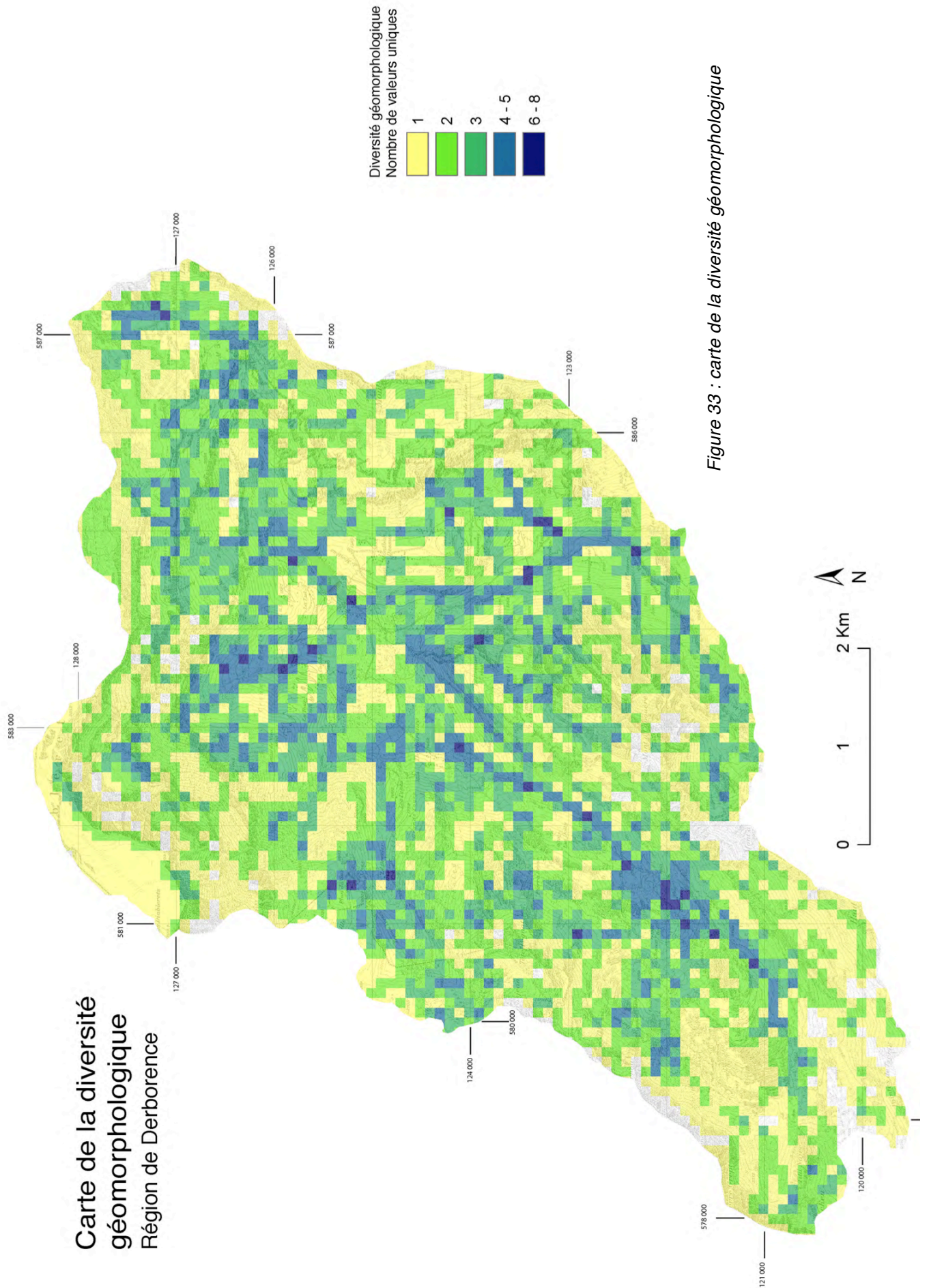


Figure 33 : carte de la diversité géomorphologique

La carte de la diversité géomorphologique est reproduite à la figure 33. Un décompte du nombre de cellules de 100m x 100m selon le nombre de valeurs uniques qu'elles contiennent a été effectué (fig. 34 et 35).

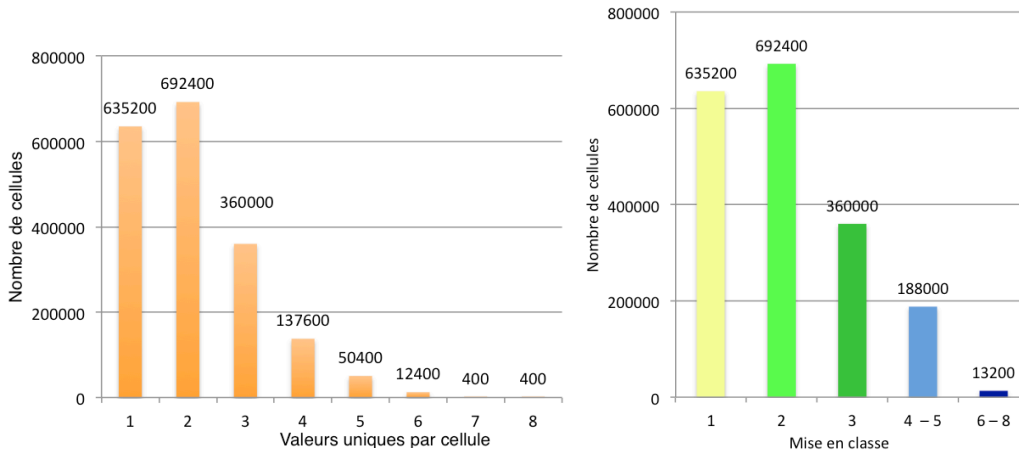


Figure 34 : Répartition des cellules par nombre de valeurs uniques et mise en classe

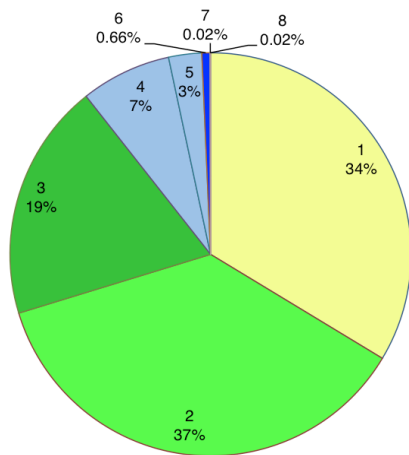


Figure 35 : Pourcentage de cellules par nombre de valeurs uniques.

La majorité de la carte présente une faible diversité (catégories 1 et 2), avec 34% des cellules contenant seulement une valeur unique et 37% deux (fig. 35). Une diversité moyenne est attribuée à près de 20% du territoire et un peu plus de 10% sont concernés par une diversité forte. Ce sont évidemment ces dernières zones qui sont les plus intéressantes d'un point de vue de diversité géomorphologique. Par rapport à d'autres travaux de ce type (Comanescu et Nedelea, 2012, Melelli, 2014 ; Serrano *et al.*, 2009 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012), la tendance est généralement semblable. Les valeurs

obtenues dans différentes études (de la plus faible à la plus forte valeur de diversité) ont été répertoriées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Valeurs de géodiversité obtenues par études

Auteur	très faible	faible	moyenne	forte	très forte
Melelli, 2014		44%	37%	19%	
Serrano <i>et al.</i> , 2009	75%	10%	10%	5%	0%
Zwolinski et Stachowiack, 2012	19%	30%	24%	19%	8%
Comanescu et Nedelea, 2012		37%	25%	31%	6%
Maret, 2015	34%	37%	19%	10%	0.7%

Chaque étude utilise naturellement un indice de diversité et une mise en classe différents et les régions concernées sont certainement diverses mais il est intéressant d'observer que dans la majorité des cas, la plus grande part de la surface est considérée comme de diversité faible.

En ce qui concerne la carte de Derborence et de manière générale, on observe une concentration des zones présentant une diversité élevée dans les fonds de vallées, suivant pratiquement les tracés des rivières (la Derbonne et la Lizerne). Ce constat a aussi été fait dans d'autres études, notamment en Finlande (Hjort et Luoto, 2012 : 77). Un lien entre la géodiversité et les éléments fluviatiles a d'autre part été relevé à plusieurs reprises (Gray, 2008 ; Hjort et Luoto, 2012 : 79 ; Serrano et Ruiz-Flaño, 2007 ; Pellitero *et al.*, 2011). Une autre constatation se retrouvant dans un certain nombre d'études est le fait que les régions affectées par les processus les plus dynamiques actuellement sont également celles qui présentent un plus grand taux de diversité (voir notamment Hjort et Luoto, 2012 ; Pellitero *et al.*, 2014).

D'autres régions concentrant des valeurs de diversité élevée peuvent également être distinguée, par exemple dans la région du Creux du Brûlé ou à proximité du Grenier de Cheville. Six zones ont été choisies pour être analysées de plus près car elles présentaient de fortes valeurs de diversité. Ces zones se situent dans le vallon de la Derbonne, proche des lieux-dits Six Long et Pierragrosse, à proximité du lac de

Derborence, du Grenier de Cheville, dans la région du Creux du Brûlé, de la Chaux de Mié et à proximité de Courtenaz (fig. 36).

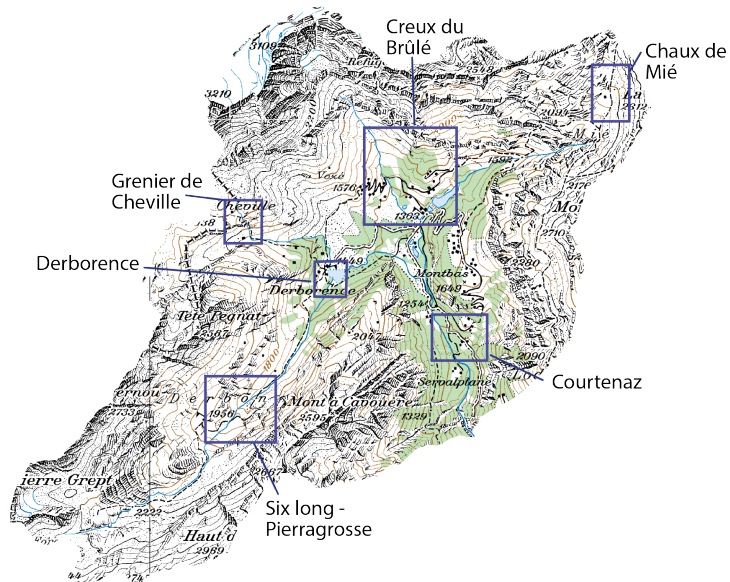


Fig. 36 : Localisation des zones choisies pour l'analyse

Les différents sites sont présentés ci-après, accompagnés d'un extrait de la carte géomorphologique, de la carte de la diversité géomorphologique, une photographie aérienne et un extrait de la carte nationale à l'échelle 1 : 25'000 (fig. 37 à 42). La légende de la carte géomorphologique permet d'avoir un aperçu rapide des processus en présence et la part des zones de diversité faible à forte figure également sous forme de pourcentages.

COURTENAZ

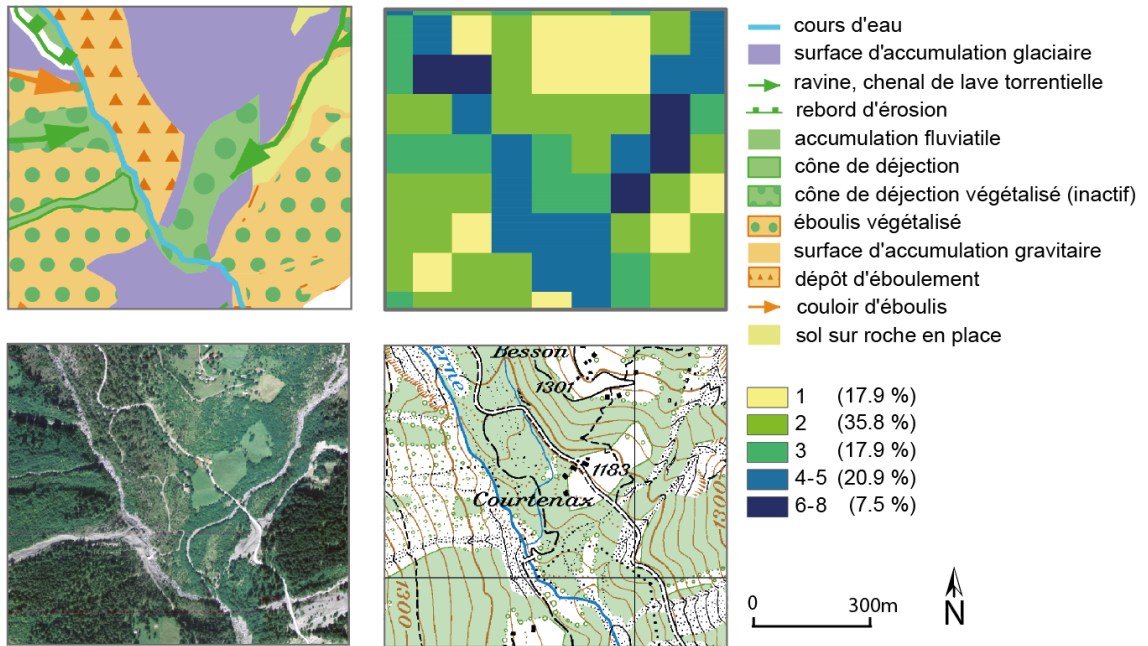


Figure 37 : Analyse de la diversité géomorphologique du secteur de Courtenaz

Courtenaz est une petite localité se trouvant dans le bas de la vallée de la Lizerne, au Sud-est du cirque de Derborence. Cette zone connaît une diversité relativement forte avec plus de 30% de la surface de catégorie 4 à 8. Ce site est très actif, avec des chenaux de laves torrentielles et des ravines entrecoupés de zones moins actives et végétalisées. La route principale reliant Aven à Derborence est ici régulièrement affectée par des processus torrentiels et gravitaires. Le dépôt de l'éboulement historique de Derborence se termine à cet endroit et une terrasse alluviale est également visible au Nord-ouest. Une grande partie du secteur est d'autre part recouverte de placage morainique. Les types de processus sont principalement gravitaires, glaciaires et fluviaux.

CHAUX DE MIE

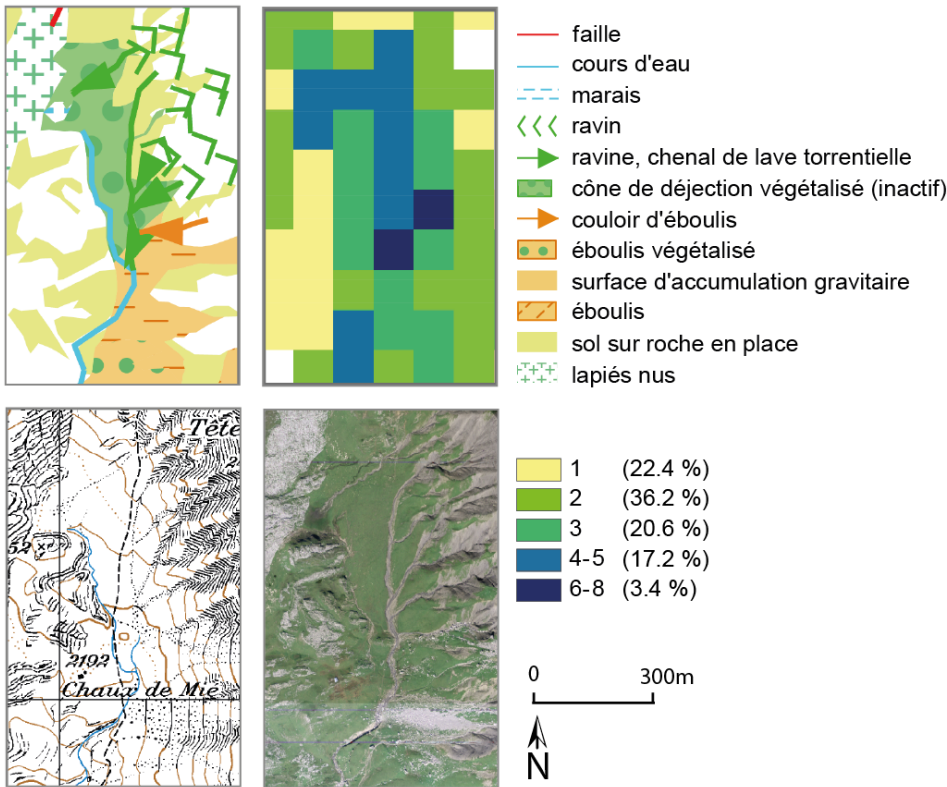


Figure 38 : Analyse de la diversité géomorphologique du secteur de La Chaux de Mié

La zone à proximité de la « Chaux de Mié », au Nord-est de la région d'étude est une zone fortement ravinée, se terminant en cône d'alluvions. Le versant à l'est est composé de schistes argileux (Berriasien et Valanginien), qui favorisent ce type d'érosion torrentielle. A l'Ouest, le plateau karstique de Mié débute avec une topographie plus adoucie et une zone de lapiés. Au centre, se trouve une petite plaine alluviale où la Lizerne prend sa source. Les types de processus en présence sont principalement gravitaires et fluviatiles. Il faut noter que la zone concernée ici est en grande partie « sans données » car les surfaces de roche en place sans accumulation ne sont pas cartographiées. Le calcul de diversité a été mené sans prendre en compte les zones sans données.

CREUX DU BRULE

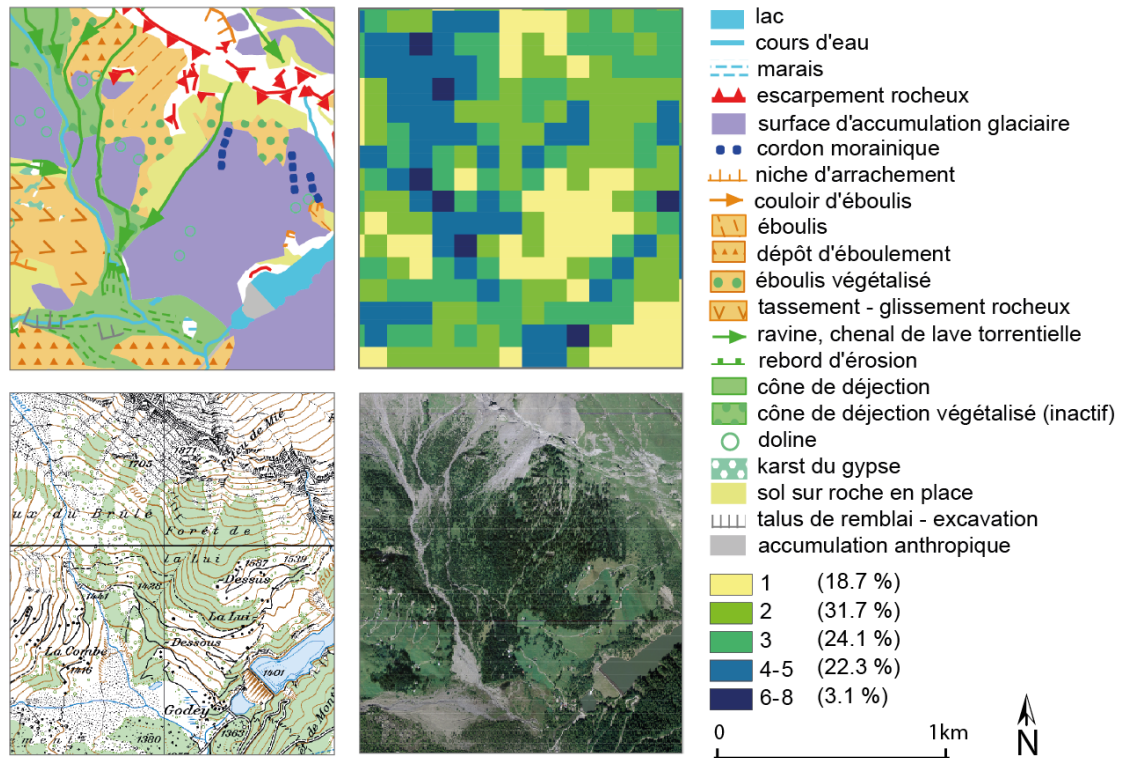


Figure 39 : Analyse de la diversité géomorphologique du secteur du Creux du Brûlé

La région du « Creux du Brûlé », au pied des parois nord du cirque de Derborence, est un vallon concentrant des torrents qui aboutissent à la zone d'épandage du Godey. A l'est, le pied de paroi est recouvert d'éboulis et de placage morainique. A l'ouest, le versant de la « Tour Vozé » est affecté par un important tassement de versant. De nombreuses dolines se trouvent aux alentours du Creux du Brûlé. Sur cet extrait de carte, les zones de diversité élevée suivent le fond du vallon.

DERBORENCE

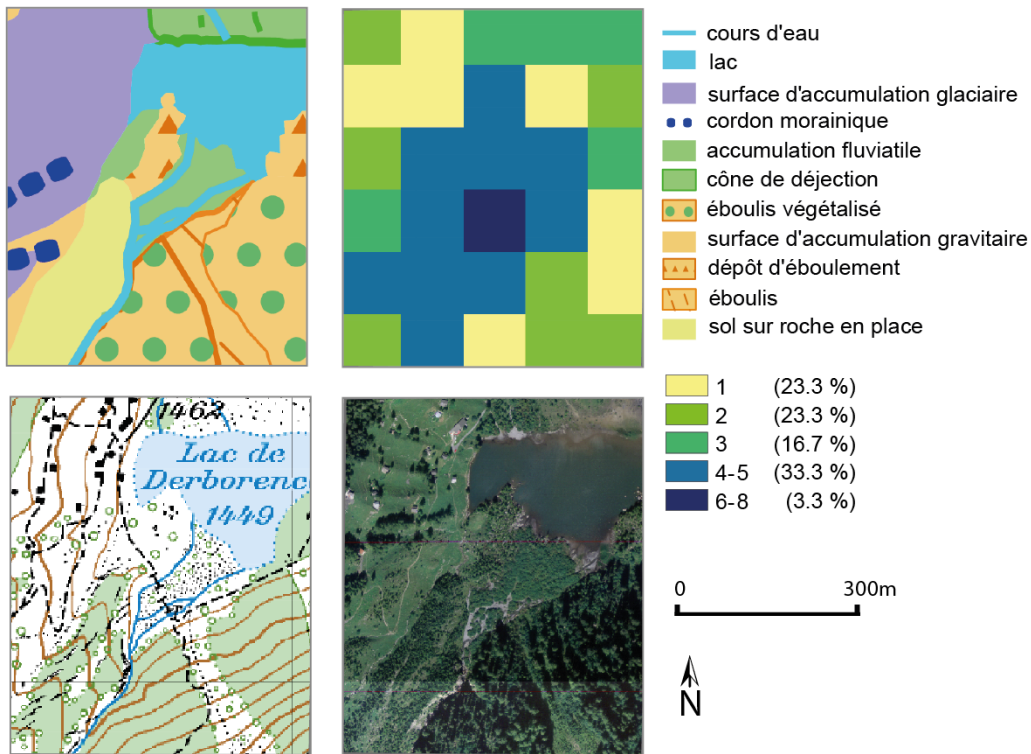


Figure 40: Analyse de la diversité géomorphologique du secteur de Derborence

À proximité du lieu-dit et du lac de Derborence, une petite zone de diversité élevée a pu être identifiée. Elle se situe pratiquement sur l'ensemble du delta de la Derbonne à son embouchure dans le lac. On trouve encore des traces de dépôt de l'éboulement des Diablerets à proximité du lac, le versant ouest est recouvert de placage morainique et le versant est de dépôts d'éboulis en partie végétalisés. Ici encore, les principaux processus sont gravitaires, fluviaux et glaciaires.

GRENIER DE CHEVILLE

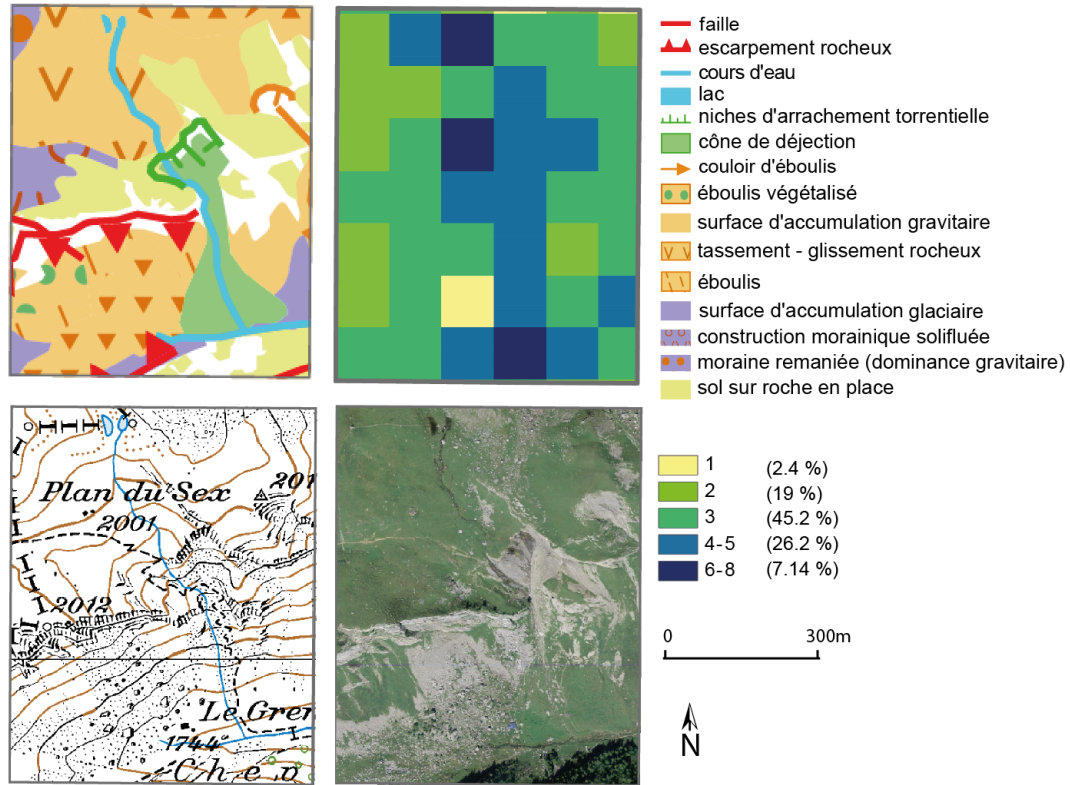


Figure 41: Analyse de la diversité géomorphologique du secteur du Grenier de Cheville

Un petit système torrentiel se trouve entre Plan du Sex et le Grenier de Cheville. Cette région est principalement affectée par des processus gravitaires avec des dépôts d'éboulements en pied de paroi à l'Ouest de ce système torrentiel et un tassement de versant sur les hauts de Plan du Sex qui affecte également les dépôts morainiques. Les processus sont très diversifiés avec une dominance gravitaire.

SIX LONG - PIERRA GROSSE

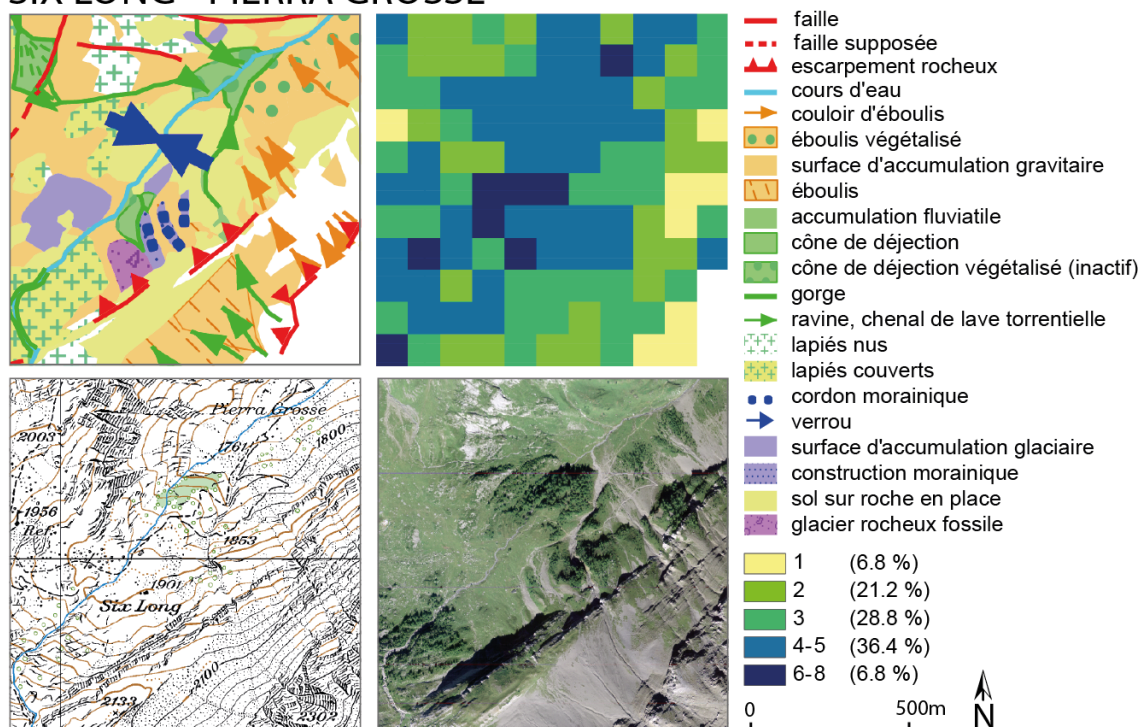


Figure 42: Analyse de la diversité géomorphologique du secteur de Six Long – Pierra Grosse

L'ensemble du fond de la vallée de la Derbonne présente des valeurs de diversité forte mais c'est le périmètre entre Six Long et Pierra Grosse qui concentre la plus grande zone de valeurs élevées. Les processus en présence sont certainement les plus diversifiés de la région de Derborence, avec des secteurs de lapiés en partie recouverts de végétation, plusieurs chenaux de laves torrentielles et des cônes de déjection, un grand nombre de ravines entrecoupant des éboulis, d'anciennes moraines, parfois sous forme de crêtes, un verrou glaciaire et enfin un glacier rocheux fossile.

SYNTHESE

Ces six zones analysées ont été délimitées de manière approximative mais si l'on examine les différents taux de diversité, les valeurs se situant au-dessus de la moyenne (4 à 8) représentent 28.4% à Courtenaz, 20.6% à la Chaux de Mié, 25.4% au Creux du Brûlé, 36.6% à Derborence, 33.3% au Grenier de Chevillle et enfin 43.2% à proximité de

Six Long – Pierra Grosse. Ces valeurs dépendent évidemment fortement de la délimitation – la zone de Derborence, par exemple, a été restreinte à la zone de très forte diversité – mais ces valeurs indiquent tout de même une tendance. La région de Six Long – Pierra Grosse se distingue ainsi très nettement des autres. Toujours en prenant en compte le biais qu’induit la délimitation de ces zones, on observe également que certaines zones concentrent une plus grande diversité de processus et de formes. C’est le cas en particulier pour le Creux du Brûlé et Six Long – Pierragrosse.

Les plus petites formes (ou les plus étroites) comme les rivières, ravines, etc. induisent de plus hautes valeurs de diversité que les grandes zones uniformes. Plus les processus sont divers et variés sur une petite surface, donc de faible ampleur, plus la diversité sera forte. On peut donc estimer que plus le travail de cartographie géomorphologique (donc d’identification des formes) sera précis, plus la diversité sera élevée. Cet état de fait peut ainsi induire un biais, dépendant de la précision du travail cartographique. La question peut donc se poser de savoir si les régions à forte diversité comme les abords des rivières ne correspondent pas simplement aux zones cartographiées le plus finement car facilement accessibles, contrairement aux régions plus élevées. Cela est évidemment possible, mais le travail de cartographie a été fait de manière à éviter de tels écueils, avec l’aide des MNT, orthophotos et autres outils informatiques. Les fonds de vallées et abords de rivières concentrent une grande variété de formes et de processus. Ces zones jouissent également d’une dynamique importante, comme l’ont relevé d’autres études (Hjort et Luoto, 2012 ; Pellitero *et al.*, 2014). La notion de dynamique rappelle d’ailleurs la notion de temps. Les régions affectées de processus récents (à l’échelle humaine et non pas géologique) peuvent être estimées comme étant plus diversifiées. Ainsi, la zone de l’éboulement, qui a en grande partie été recouvert de végétation, n’est plus si dynamique et présente de faibles valeurs de diversité. Par contre, les zones alluviales et torrentielles connaissent des valeurs plus fortes. Dans la majorité des zones de concentration de diversité, on retrouve ainsi des cônes de déjection, des chenaux de laves torrentielles et des rivières.

CONCLUSION

De manière générale, les zones présentant une diversité élevée se retrouvent donc dans les fonds de vallée, là où les processus sont les plus dynamiques. Les périmètres choisis pour être analysés car concentrant une forte diversité sont (1) un fond de vallée où se rejoignent de nombreux cônes de déjection torrentiels et éboulis, (2) une petite plaine alluviale d'altitude où la Lizerne prend sa source, en pied de versant fortement éboulisé, (3) un vallon regroupant de nombreux chenaux de laves torrentielles, (4) un delta au bord d'un lac affecté par l'alluvionnement, (5) un petit système torrentiel à la source d'une rivière, (6) une région concernée par des processus très variés (glaciaires, karstiques, périglaciaires etc.). Ces zones sont effectivement dynamiques et les formes en présence sont de faible ampleur. Elles représentent toutes des zones d'intérêt d'un point de vue géomorphologique et pourraient faire l'objet de mesures de valorisation pour le géotourisme ou de protection dans une optique de géoconservation.

Une autre étude portant sur la géodiversité a été menée dans la région. Une carte de la géodiversité a été faite sur la base de données morphométriques, ne prenant donc pas en compte les processus et la dynamique (Jaskulska *et al.*, 2013 ; fig. 43). Il est dès lors intéressant de comparer cette carte à celle obtenue dans ce travail. On peut s'étonner de la faible ressemblance en terme de résultats ; ces cartes sont pratiquement inversées. Dans le cas de la carte de Jaskulska, les zones de forte déclivité (escarpements, gorges, sommets, etc.) présentent les plus fortes valeurs de diversité. Les sommets et les « marches d'escalier » de la face Sud des Diablerets se distinguent très nettement. Par contre, les fonds de vallée récoltent de très faibles valeurs de diversité.

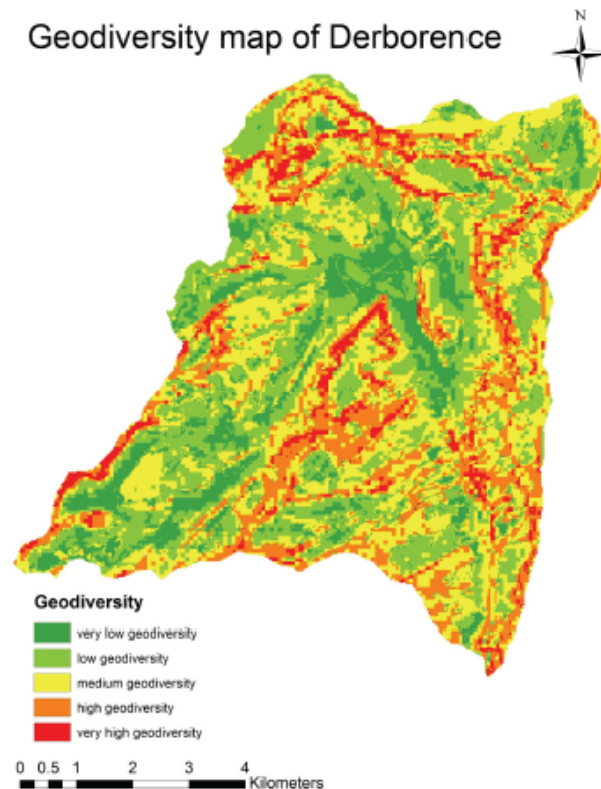


Figure 43 : Carte de la géodiversité à Derborence (Jaskulska et al., 2013)

Cette comparaison illustre bien la problématique se cachant derrière les méthodes indirectes comme celle utilisée par Jaskulska. On peut estimer que les facteurs géomorphologiques sont bien mal représentés par les valeurs morphométriques bien qu'elles soient estimées comme des valeurs de substitution pour rendre compte de la géodiversité. Cette remarque peut également être étendue à d'autres études qui mesurent la « géodiversité » alors qu'elles s'appuient seulement sur quelques facteurs de diversité ne représentant pas l'ensemble de la diversité abiotique (c'est le cas notamment des études de Benito-Calvo, 2009 ; Jaskulska *et al.*, 2013 ; Parks et Mulligan, 2010 ; Zwolinski, 2010 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012).

Pour une meilleure comparaison entre les cartes obtenues par Jaskulska et la carte obtenue à l'aide de la méthode présentée dans ce travail, il faudrait que la méthode soit également appliquée aux autres éléments constituant la géodiversité (notamment la géologie et la pédologie) pour créer une carte de géodiversité globale. Dans tous les cas, l'observation que la carte de diversité géomorphologique et la carte de géodiversité basée sur des facteurs morphométriques sont radicalement différentes s'impose.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Si la carte géomorphologique permet un rapide aperçu des processus en présence grâce aux différentes couleurs et des formes par leur délimitation, la carte de la diversité géomorphologique permet de distinguer les zones concentrant le plus de formes sur une surface restreinte. L'analyse a en outre permis de constater que ces zones présentent une dynamique souvent forte.

Il faut néanmoins relever que des biais sont possibles, par exemple du fait que les rivières et les ravines sont généralement de plus faible ampleur que des formes issues d'autres processus plus étendus (éboulis, surfaces d'accumulation morainique, etc.) et récolteront forcément des valeurs plus élevées mais on peut espérer qu'avec la conjugaison d'autres cartes (géologiques, pédologiques, tectoniques, etc.), on obtienne des résultats au plus près de la réalité.

D'autre part, cette méthode se base sur la carte géomorphologique qui distingue un processus dominant alors que certaines formes peuvent être le fait de plusieurs processus. De plus, cette carte mesure la diversité des formes plutôt que des processus, il serait éventuellement intéressant de tester la séparation de ces deux notions pour cartographier la diversité des formes et des processus individuellement.

Evidemment, la diversité est un concept ; on ne peut pas réellement l'observer dans l'espace, il faut donc se fier à ce qui ressort des calculs et en ressortir ce qui peut être intéressant. Ce travail a permis de tirer des conclusions qui ont déjà été constatées dans d'autres études traitant de la diversité abiotique (Gray, 2008 ; Hjort et Luoto, 2012 : 79 ; Serrano et Ruiz-Flaño, 2007 ; Pellitero *et al.*, 2011 et 2014).

De manière plus générale, il faut relever le fait que les cartes de diversité abiotique, souvent qualifiées de cartes de géodiversité, représentent, dans certains cas, seulement quelques éléments constituant la géodiversité (*partial maps* ; Benito-Calvo *et al.*, 2009 ; Parks et Mulligan, 2010) ou alors se basent uniquement sur des valeurs de substitutions

(*surrogate elements*), bien souvent les éléments morphométriques (Jaskulska *et al*, 2013 ; Zwolinski, 2010 ; Zwolinski et Stachowiack, 2012). Il faudrait qu'un consensus soit trouvé entre chercheurs pour que les cartes de géodiversité soient qualifiées comme tel uniquement lorsqu'elles prennent en compte l'ensemble des facteurs de diversité abiotique¹⁰.

D'un point de vue pratique pour la région de Derborence, la carte de la diversité géomorphologique permet d'identifier les zones les plus importantes pour la géomorphologie. Ces zones pourraient faire l'objet d'actions ciblées pour la gestion ou la valorisation de la nature. Les valeurs de diversité pourraient aussi être ajoutées aux travaux d'évaluation de géomorphosites.

¹⁰ Cette question a été débattue lors de la séance thématique sur la géodiversité et les géopatrimoine à l'occasion de la dernière assemblée de l'EGU (European Geosciences Union) à Vienne (avril 2015).

9. Conclusion

SYNTHESE

Au terme de ce travail, une méthode de transformation de la carte géomorphologique selon la légende de l'Université de Lausanne en carte de la diversité géomorphologique a été développée et testée à Derborence. Cette carte se base sur un indice de diversité géomorphologique inspiré des calculs de richesse spécifique utilisés pour les études de biodiversité. Cette méthode simple est presque entièrement automatisée à l'aide d'outils SIG.

Dans cette étude, la géomorphologie de la région de Derborence et de la partie haute de la vallée de la Lizerne, a été mise en lumière d'abord à l'aide de la carte géomorphologique et des connaissances préalables, et ensuite en s'appuyant sur la carte de la diversité géomorphologique. Ces deux analyses se complètent parfaitement et permettent d'une part de définir la morphogenèse et les formes du terrain et, d'autre part, de qualifier le terrain selon sa diversité.

Si la cartographie est un excellent moyen de communiquer les connaissances géomorphologiques, la carte géomorphologique classique contient des informations pointues qui ne peuvent être comprises par tout un chacun. La carte est souvent aussi très chargée et, ainsi, de lecture difficile. L'atout principal des cartes quantitatives telles que la carte de la diversité géomorphologique développée dans ce travail est leur simplicité de lecture et d'interprétation. D'autre part, si certaines informations ne sont plus disponibles (notamment les délimitations des formes ainsi que leur description), une nouvelle information apparaît qui est le degré de diversité géomorphologique du terrain. Cette nouvelle donnée est facilement appréhendable et peut servir pour définir des zones d'importance pour la gestion de la nature ou pour la mise en valeur géotouristique.

La méthode développée a l'avantage d'utiliser une classification existante et éprouvée : la légende géomorphologique de l'Université de Lausanne. Les informations géomorphologiques, à savoir les processus et les formes, sont ordonnés par grands groupes morphogénétiques (gravitaire, glaciaire, fluviale, etc.). L'échelle de travail de la carte géomorphologique, à savoir une base de 1 :10 000^e est une échelle « à taille

humaine », car il est plus aisé de se représenter une surface de 100 m² plutôt que des surfaces (pluri-)kilométriques comme c'est le cas de cartes se basant sur les morphostructures ou systèmes morphogénétiques. La carte de diversité géomorphologique obtenue ici est donc indiquée pour une utilisation appliquée au terrain.

LIMITES

La première partie de ce travail a consisté à cartographier les formes et processus à la surface du terrain selon la légende géomorphologique. La carte obtenue pourrait être améliorée car elle représente une interprétation du territoire qui pourrait différer selon les personnes ; certains chercheurs auraient peut-être attribué certaines formes à d'autres processus ou délimité les formes différemment. La précision des traits est également variable selon les entités. La cause en est le fait que le changement d'échelle se fait très rapidement avec les logiciels SIG et lors du processus de cartographie, il est possible de travailler beaucoup plus grossièrement ou plus finement sans que l'on s'en aperçoive. L'ampleur du terrain (53 km²) représentait dans ce cas un désavantage, le travail étant très long.

Par la suite, une méthode de passage de la carte d'origine à la carte de la diversité a été développée. Le choix s'est porté sur une méthode simple : l'application d'une grille et un changement d'échelle (de 5 m à 100 m) qui a permis ensuite de calculer le nombre d'entités uniques par cellule. Ce chiffre a été attribué ensuite à l'ensemble de la cellule. Avant cela, la carte géomorphologique a dû subir des modifications pour être transformée en un raster sans compromis visuels tels la transformation d'entités en lignes ou points ainsi que l'utilisation de figurés particuliers. Une première méthode de passage de la carte initiale à la carte des surfaces a ainsi dû être développée. Cette méthode présente quelques désavantages qui sont le temps relativement long et le fait qu'elle soit seulement en partie automatisée. L'enjeu majeur de cette étape est l'attribution de la bonne taille aux éléments à modifier sans pour autant viser une trop grande précision, ce qui nécessite du temps supplémentaire.

Les dernières étapes ont consisté à développer un indice de diversité et à créer la carte de la diversité. Ici, le choix de l'échelle de la carte a été un enjeu majeur. Plusieurs tests ont été conduits et il a fallu choisir l'échelle qui permettait de faire ressortir des informations intéressantes (dans ce cas, la grille avait une résolution de 100m). À grande échelle, les zones diversifiées suivaient pratiquement les limites des formes alors qu'à petite échelle l'information était pratiquement uniforme sur l'ensemble du territoire. L'échelle choisie a ainsi permis de faire ressortir des agrégations de valeurs, ce qui met en valeur des zones intéressantes. La mise en classes des valeurs de diversité est également très importante pour un bon rendu de la carte.

PERSPECTIVES

Une prochaine étape qui n'a pas pu être réalisée dans ce travail est l'application de cette méthode aux autres données géologiques (lithologie, tectonique, pédologie, etc.) par la création de cartes partielles de géodiversité (*partial maps*). L'agrégation de l'ensemble de ces cartes permettrait de créer une carte de la géodiversité en général. Les données de biodiversité pourraient par la suite être mises en regard de cette carte afin d'améliorer les connaissances concernant les interactions existant dans la nature.

D'autre part, cette méthode devrait également être appliquée à des échelles et des environnements différents afin d'approfondir la recherche concernant la diversité géomorphologique et d'améliorer la méthode.

Il serait également enrichissant d'appliquer cette méthode sur plusieurs décennies, par exemple, et d'observer l'évolution de la diversité géomorphologique dans le temps. Cela pourrait déjà être fait à l'aide de cartes historiques que l'on pourrait transformer en carte géomorphologique mais également dans le futur, afin d'analyser les évolutions.

Les études de géodiversité pourraient d'autre part être utilisées, à l'avenir, pour compléter les travaux d'évaluation de géosites et/ou géomorphosites. La géodiversité pourrait

constituer une valeur supplémentaire ou simplement donner une information complémentaire aux sites.

Comme il a déjà été précisé à plusieurs reprises, la géodiversité est fréquemment considérée comme un outil d'application, notamment dans les parcs naturels ou géoparcs. La cartographie de la géodiversité permet effectivement d'évaluer le territoire et de définir les zones présentant une grande géodiversité. Ces cartes présentent l'avantage d'être plus facilement abordables aux non initiés et pourraient aisément être utilisées pour la gestion du territoire et du patrimoine naturel.

10. Bibliographie

- Académie suisse des sciences naturelles (1999). Inventaire des géotopes d'importance nationale. *Geol. Insubrica*, 4 : 25-46.
- Alexandrowicz, Z., et Kozłowski, S. (1999). From selected geosites to geodiversity conservation - Polish example of modern framework. In D. Barenttino, M. Vallejo et E. Gallego (Eds), *Towards the balanced management and conservation of the geological heritage in the new millenium* (pp. 40-44). Madrid : Sociedad Geologica de Espana.
- Badoux, H. (1972). *Tectonique de la nappe de Morcles entre Rhône et Lizerne*. Berne: Commission Géologique Suisse.
- Badoux, H., et Gabus, J.-H. (1991). *Atlas géologique de la Suisse. Feuille 1285 Les Diablerets*. Berne: Service hydrologique et géologique national.
- Badoux, H., Bonnard, E. G., Burri, M. et Vischer, A. (1959). *Atlas géologique de la Suisse. Feuille 1286 St-Léonard*. Berne: Service hydrologique et géologique national.
- Badoux, H., Burri, M., Gabus, J.-H., Krummenacher, D., Loup G., et Sublet, P. (1971). *Atlas géologique de la Suisse. Feuille 1305 Dent de Morcles*. Berne: Service hydrologique et géologique national.
- Barcella, D., et Studer, V. (1994). *Levé de terrain géomorphologique de la vallée de la Derbonne*, n° 191. Institut de géographie, Université de Lausanne.
- Becker, F. (1882). Der Bergsturz der Diablerets. *Jahrbuch des Schweizer Alpenclub*, 18, 310-316.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Magri, O., et Meza, P. (2009). Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(10), 1433-1445.
- Bertin, J. (1977). *La graphique et le traitement graphique de l'information* (Vol. 1). Paris: Flammarion.
- Bertin, J. (1999). *Sémiologie graphique: Les diagrammes, les réseaux, les cartes* (Les réimpressions des Éditions de l'EHESS).
- Brazier, V., Bruneau, P., Gordon, J. E., et Rennie, A. F. (2012). Making Space for Nature in a Changing Climate: The Role of Geodiversity in Biodiversity Conservation. *Scottish Geographical Journal*, 128(3-4), 211-233.
- Brunet, R. (1987). *La carte, mode d'emploi*. Paris: Fayard.
- Bruschi, V. M., Cendrero, A., et Albertos, J. A. C. (2011). A statistical approach to the validation and optimisation of geoheritage assessment procedures. *Geoheritage*, 3(3), 131–149.
- Burek, C. V., et Potter, J. (2006). Local geodiversity action plans - setting to context for geological conservation. *English Nature* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.english-nature.org.uk> (consulté le 23.04.13).
- Burek, C. V., et Prosser, C. D. (2008). The history of geoconservation: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 300(1), 1-5.
- Burri, M. (1994). *Les roches*. Martigny, Pillet. Coll. Connaître la nature en Valais.

- Carcavilla, L., Durán, J. J., García-Cortés, A., et López-Martínez, J. (2009). Geological Heritage and Geoconservation in Spain: Past, Present, and Future. *Geoheritage*, 1(2-4), 75 - 91.
- Cayla, N., et Hobléa, F. (2011). La Via GéoAlpina: itinérance géologique à travers les Alpes. In: Reynard, E., L. Laigre et N. Kramar. (eds), *Les géosciences au service de la société*. Lausanne, Institut de géographie. Géovisions, 37, 119-130.
- Chopard, V., Linder, D., Farine J., Perrin, J., et Weber, E. (2004). La grotte du Chaudron. Une source thermale dans le karst de Derborence (VS). *Stalactite*, 54(2), 25-35.
- Comănescu, L., et Nedelea, A. (2012). The assessment of geodiversity - a premise for declaring the geopark Buzăului County (Romania). *Journal of earth system science*, 121(6), 1493-1500.
- Coque, R. (2006). *Géomorphologie* (6e édition). Paris: Armand Colin.
- Coutterand, S. (2010). *Étude géomorphologique des flux glaciaires dans les Alpes nord-occidentales au Pléistocène récent. Du maximum de la dernière glaciation aux premières étapes de la déglaciation*. Thèse de doctorat, Université de Savoie.
- Coutterand, S., Reynard, E. et Nicoud, G. (2015). *Les stades tardiglaciaires du Val d'Hérens, approche chronologique*. Article à soumettre à Swiss Journal of Geosciences.
- Cuenin, R. (1972). *Cartographie générale*. Editions Eyrolles : Paris
- Derborence (2013, 15 mars). In *Wikipédia* [en ligne]. Disponible sur [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Derborence_\(Valais\)&toldid=90305165](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Derborence_(Valais)&toldid=90305165) (consulté le 23.04.2013).
- Dixon, G. (1995). Aspects of geoconservation in Tasmania: a preliminary review of significant Earth features. *Report to the Australian Heritage Commission, Occasional paper 32*. Hobart : Australian Heritage Commission.
- Dorthe-Monachon, C. et Schoeneich, P. (1993). Ligne d'équilibre des glaciers : le stade de référence de 1850 dans les Alpes calcaires occidentales. *Geogr. Helv.*, 3, 125-134.
- Dorthe-Monachon, C. (1993). *Étude des stades tardiglaciaires des vallées de la rive droite du Rhône entre Loèche et Martigny*. Lausanne, Institut de géographie. *Travaux et Recherches*, 10.
- Droz, J. (1989). Esquisse d'un catalogue floristique de la région de Derborence (Conthey et Ardon, VS). *Bull. Murithienne*, 197, 187-201.
- Droz, J. (1992). *La végétation de la région de Derborence (Conthey, Chamoson, Valais)*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne.
- Duff, K. (1994). Natural areas: an holistic approach to conservation based on geology. In: D. O'Halloran *et al.* (eds), *Geological and landscape conservation*. London, Geological Society, 121-126.
- Erikstad, L. (2013). Geoheritage and geodiversity management - the questions for tomorrow. *Proceedings of the Geologists' Association* 124(4) 713-719.
- European Manifesto on Earth Heritage and Geodiversity (2004). Disponible sur http://www.eurogeologists.de/images/content/panels_of_experts/soil_protection_geological_heritage/ManifestoEarthHeritage_Geodiversity.pdf.

- Fallot, J.-M. (1986). *Premiers résultats des mesures du vent sur l'arête du Mont Gond (VS) durant l'hiver 1985-1986: rapport intermédiaire destiné à M. Chevrier dans le cadre d'une étude visant à diminuer la formation d'une corniche sur l'arête méridionale du Mont Gond (VS)*. Université de Fribourg, Institut de géographie.
- Fallot, J.-M. (2014). La climatologie. In: S. Rey-Carron et C. Rey, *Derborence, la nature et les hommes*, Sierre : Monographic, 25-31.
- Farquet, P. et Mariétan, I. (1929). *68^{ème} réunion de la Murithienne et rapports had-oc*.
- Favre, G. (2014). L'hydrogéologie. In: S. Rey-Carron et C. Rey, *Derborence, la nature et les hommes*, Sierre : Monographic, 25-31.
- Gabus, J.-H. (1958). *L'Ultrasuisse entre Derborence et Bex (Alpes vaudoises)*. Berne : Kümmerly et Frey.
- Garazi, G., et Moret, A. (1999). *Eboulements de Derborence: Etude géologique et géomécanique (Valais/Suisse)*. Travail de diplôme de géologie. Section des Sciences de la Terre de l'Université de Genève.
- Genoud, M. (2008). *Inventaire, évaluation et projets de valorisation des géomorphosites du Val de Bagnes*. Mémoire de master en géographie. Université de Lausanne, Faculté des géosciences, Institut de géographie. Disponible sur : <http://mesoscaphe.unil.ch/igul/memoires/>.
- Gordon, J. E., Barron, H. F., Hanson, J. D., et Thomas, M. F. (2011). Engaging with geodiversity - why it matters. *Proceedings of the Geologists' Association*, 123(1-6).
- Gordon, J. E., et Barron, H. F. (2012). Valuing Geodiversity and Geoconservation: developing a more strategic ecosystem approach. *Scottish Geographical Journal*, 128(3-4), 278-297.
- Grandgirard, V. (1999). L'évaluation des géotopes. *Geol. Insubr.*, 4 (1), 66-69.
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. Chichester : John Wiley et Sons Ltd.
- Gray, M. (2005). Geodiversity and geoconservation: what, why and how. *The George Wright Forum*, 22(3), 4-12.
- Gray, M. (2008). Geodiversity: developing the paradigm. *Proceedings of the Geologists' Association*, 119(3), 287-298.
- Gremaud, V. (2008). Géologie du karst de Tsanfleuron. In: Hobléa, F., E. Reynard et J.-J. Delannoy (eds). *Karsts de montagne: géomorphologie, patrimoine et ressources*. Collection Edytem, Cahiers de géographie, 7, 127-134.
- Gremaud, V. (2011). *Relations between retreating alpine glaciers and karst aquifer dynamics: Tsanfleuron-Sanetsch experimental test site, Swiss Alps*. Thèse de doctorat. Neuchâtel: Université de Neuchâtel, Faculté des sciences.
- Gustavsson, M., Kolstrup, E., et Seijmonsbergen, A. C. (2006). A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, 77(1-2), 90-111.
- Hjort, J., et Luoto, M. (2010). Geodiversity of high-latitude landscapes in northern Finland. *Geomorphology*, 115(1), 109-116.

- Hjort, J., et Luoto, M. (2012). Can geodiversity be predicted from space? *Geomorphology*, 153, 74-80.
- Jaskulska, A., Reynard, E., Zwolinski, Z. (2013). Geodiversity assessment for environmental management of geomorphosites: Derborence and Illgraben, Swiss Alps. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 15, EGU2013-838-1.
- Jeanbourquin, P. (1991). L'« Ultrahelvétique » de Derborence (Valais, Suisse). *Bull. Murithienne*, 109, 65-98.
- Jeanneret, B. (1995). *Levé géomorphologique dans les Hautes Alpes Calcaires: entre Derborence et le Sanetsch*. Institut de géographie, Université de Lausanne, Levé de terrain n° 230.
- Jeannin, P. Y., et Beuret, S. (1995). Multitraçage dans la région de Derborence. *Cavernes*, 1, 37-48.
- Joly, F. (1962). Principes pour une méthode de cartographie géomorphologique. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 39(309-310), 270-278.
- Jonasson, C., Gordon, J. E., Kociánová, M., Josefsson, M., Dvorak, I. J., et Thompson, D. (2005). Links between geodiversity and biodiversity in European mountains: case studies from Sweden, Scotland and the Czech Republic. *The Mountains of Europe: Conservation, Management and Initiatives*. 57-70.
- Joyce, E. B. (1997). Assessing geological heritage. In R. Eberhard (Ed), *Pattern and Process: Towards a Regional Approach to National Estate Assessment of Geodiversity* (pp. 35-40). Canberra : Environment Forest Taskforce.
- Kozlik, L. (2006). *Les géomorphosites culturels des vallées du Trient, de l'Eau Noire et de Salanfe. Inventaire, évaluation et valorisation*. Mémoire de master en géographie. Université de Lausanne, Faculté des géosciences, Institut de géographie. Disponible sur : <http://mesoscaphe.unil.ch/igul/memoires/>.
- Kozlik, L. et Regolini, G. (2014). Un petit lac pas comme les autres, tour du lac. Brochure non publiée. Consulté sous: http://www.derborence.ch/wp-content/pdf/brochure_Lac_ecran.pdf.
- Kozłowski, S. (2004). Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. *Przegląd Geologiczny*, 52(8/2), 833-837.
- Kuonen, T. (2000). *Derborence et la vallée de la Lizerne*. Sierre: Monographic.
- Lambiel, C., Maillard, B., Kummert, M., et Reynard, E. (2015). Geomorphology of the Hérens valley (Swiss Alps). *Journal of Maps*.
- Lee, E. M. (2001). Geomorphological mapping. Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications*, 18(1), 53-56.
- Lugeon, M. (1914-1916). *Les Hautes Alpes calcaires entre la Lizerne et la Kander (Wildhorn, Wildstrubel, Balmhorn et Torrenthorn)*. Berne: A. Francke, 3 volumes.
- Maillard, B., Lambiel, C., Martin, S., Pellitero, R., Reynard, E., et Schoeneich, P. (2011). The ArcGIS version of the geomorphological mapping legend of the University of Lausanne. Disponible sur : <http://unil.ch/igul/lang/fr/pid/19238>.
- Maillard, B. (2009). *Inventaire des géomorphosites des vallées d'Entremont et de Ferret. Propositions de valorisation*. Mémoire de master en géographie. Université de Lausanne, Faculté des géosciences, Institut de géographie. Disponible sur : <http://mesoscaphe.unil.ch/igul/memoires/>.

- Maillard, B., et Reynard, E. (2011). Inventaire des géomorphosites des vallées d'Entremont et de Ferret (Valais) et propositions de valorisation. In C. Lambiel, E. Reynard, et C. Scapozza (Eds), *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie*, 3-5 septembre 2009, Olivone (pp. 1–17). Lausanne: Université, Institut de géographie. Consulté à l'adresse <http://www.unil.ch/igul/page84172.html>.
- Maret, H. (2015). *Cartographie de la diversité géomorphologique. Derborence et la vallée de la Lizerne (Valais, Suisse)*. Mémoire de master en préparation. Université de Lausanne, Institut de géographie et durabilité.
- Maret, H. et Reynard, E. (2015). Géomorphologie de la région de Derborence. *Bull. Murithienne*, 131 [in press].
- Marguerat, P.-P. et M. Dadó (1996). Levé géomorphologique de la région de Derborence. Institut de géographie, Université de Lausanne, Levé de terrain n° 243.
- Mariétan, I. (1960). Le Val de Derborence. *Bull. Murithienne*, 77, 92-126.
- Marthaler, M. (2001). *Le Cervin est-il africain ?*. Lausanne: Ed. Loisirs et Pédagogie.
- Martin, S. (2013). *Valoriser le géopatrimoine par la médiation indirecte et la visualisation des objets géomorphologiques*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne. Lausanne, Institut de géographie et durabilité, Géovisions, 41.
- Mercier, D. (2010). *La géomorphologie paraglacière. Analyse de crises érosives d'origine climatique dans les environnements englacés et sur leurs marges*. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Nastase, M., Cuculici, R., Muratoreanu, G., Grigorescu, I., et Dragota, C. (2012). A GIS-based assessment of geodiversity in the Romanian protected areas. A preliminary approach. In *Best practices: Application of GIS technologies for conservation of natural and cultural heritage sites. Proceedings of the European SCGIS Conference Sofia, 21-23 mai 2012*, (pp. 17-22). Disponible sur : <http://proc.scgis.scgisbg.org/> (consulté le 9 avril 2013).
- Nieto, L. M. (2001). Geodiversidad: Propuesta de una definicion integradora. *Boletín Geológico y Minero*, 112, 3-12.
- O'Halloran, D. (Ed) (1994). *Geological and landscape conservation: proceedings of the Malvern International Conference 1993*. Geological Society Publishing House.
- Office fédéral de l'environnement (2014, 13 janvier). *Districts francs fédéraux* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch/schutzgebiete-inventare/07843/index.html?lang=fr> (consulté le 02.06.2015)
- Panizza, M., et Piacente S. (2009). Cultural geomorphology and geodiversity. In E. Reynard, P. Coratza, et G. Regolini-Bissig (Eds), *Geomorphosites* (pp. 35-48). München : Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
- Panizza, M. (2009). The geomorphodiversity of the Dolomites (Italy): a key of geoheritage assessment. *Geoheritage*, 1(1), 33-42.
- Panizza, M. (2011). Les Dolomites, site inscrit au Patrimoine mondial, et leur géomorphodiversité. In E. Reynard, L. Laigre, et N. Kramar (Eds), *Les géosciences au service de la société. Actes du colloque en l'honneur du Professeur Michel Marthaler*, 24-26 juin 2010, Lausanne (Géovisions n° 37, pp. 13-20). Institut de géographie, Université de Lausanne.

- Parks, K. E., et Mulligan, M. (2010). On the relationship between a resource based measure of geodiversity and broad scale biodiversity patterns. *Biodiversity and Conservation*, 19(9), 2751-2766.
- Pellitero, R., González, M. J., Ruiz-Flaño, P., et Serrano, E. (2010). Geodiversity and geomorphosite assessment applied to a natural protected area: the Ebro and Rudron Gorges Natural Park (Spain). *Geoheritage*, 3(3), 163-174.
- Pellitero, R., Manosso, F., et Serrano, E. (2014). Mid- and large- scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (NW Spain) and Serra do Cadeado (Paraná, Brazil) : Methodology and application for land management. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*
- Pemberton, M. (2000). Conserving geodiversity, the importance of valuing our geological heritage. In *Geological Society of Australia abstracts* (Vol. 59, pp. 384-390). Geological Society of Australia.
- Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J., Santos, L. (2013). Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil) : An innovative approach. *Environmental Management* (Vol 52, pp. 541-552)
- Pereira, D. I., Santos, L., Silva, J., Pereira, P., Brilha, J. B., Silva, J., et Rodrigues, C. (2012). Mapping regional geodiversity in Brazil and Portugal. *Geologia dell'Ambiente (Suppl. no. 3)*
- Perret, A. (2008). *Inventaire de géomorphosites du Parc Jurassien vaudois. Essai d'intégration des géotopes spéléologiques et valorisation géomorphologique des réserves naturelles*. Mémoire de master en géographie. Université de Lausanne, Faculté des géosciences, Institut de géographie. Disponible sur : <http://mesoscaph.unil.ch/igul/memoires/>.
- Perret, A., et Martin, S. (2014). *Sur les traces d'Antoine. Tour de l'éboulement*. Brochure non publiée consulté sous: http://www.derborence.ch/wp-content/pdf/brochure_Eboulement_print1.pdf.
- Perret, A., et Reynard, E. (2011). Inventaire des géomorphosites du Parc jurassien vaudois (Col du Marchairuz, Vaud). In C. Lambiel, E. Reynard, et C. Scapozza (Eds), *La géomorphologie alpine : entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie*, 3-5 septembre 2009, Olivone (pp. 19–34). Lausanne: Université, Institut de géographie. Consulté à l'adresse <http://www.unil.ch/igul/page84172.html>
- Pralong, J.-P. (2001). *Des Muverans à la Dent Blanche: parcours dans les mers et les océans de nos montagnes*. Mémoire de licence, Université de Lausanne, Institut de Géographie.
- Ramuz, C.-F. (1934). *Derborence*. Lausanne: Mermoz.
- Regolini, G., et Martin, S. (2014). *Chaque filet d'eau a son chemin*. Tour du Vallon de la Lizerne. Brochure non publiée. Consulté sous: http://www.derborence.ch/wp-content/pdf/brochure_Lizerne_print1.pdf.
- Regolini-Bissig, G., Alves, A., Brandolini, P., Garavaglia, V., Ghiraldi, L., Giardino, M., ... Welc, E. (2008). *Carte géotouristique de Derborence*. Lausanne: Institut de géographie et durabilité. Consulté à l'adresse <http://www.unil.ch/igul/page82734.html>.
- Regolini-Bissig G. et al. (2009). How was Lake Derborence (VS, Switzerland) formed? Popularisation of geosciences by means of a geotourist map, 6th European

- Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, Munich, 9-12 June 2009, *Proceedings*, vol. 2, 290-293.
- Rey-Carron, S., et Rey, C. (2014). *Derborence, la nature et les hommes*. Sierre: Monographic.
- Rey, C., Rey-Carron, S., Keusch, P., Dessimoz, F. (2014). Protection. In: S. Rey-Carron et C. Rey, *Derborence, la nature et les hommes*, Sierre : Monographic, 329-332.
- Reynard, E. (2004). Geosites. In A. S., Goudie (Ed). *Encyclopedia of Geomorphology* (p. 440). London : Routledge.
- Reynard, E. (2008). Le lapiaz de Tsanfleuron. Un paysage glacio-karstique à protéger et à valoriser. In: Hobléa, F., E. Reynard et J.-J. Delannoy (eds). *Karsts de montagne: géomorphologie, patrimoine et ressources*. Collection Edytem, Cahiers de géographie, 7, 157-168.
- Reynard, E. (2009). Geomorphosites: definitions and characteristics. In E. Reynard, P. Coratza, et G. Regolini-Bissig (Eds), *Geomorphosites* (pp. 9-20). München : Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
- Reynard, E. (2012). Geoheritage protection and promotion in Switzerland. *European Geologist*, 34, 44-47.
- Reynard, E., Berger, J.-P. □ Constandache, M., Felber, M., Grangier, L., Häuselmann, P., Jeannin, P.-Y. et Martin, S. (2012). *Révision de l'inventaire des géotopes suisses : rapport final*. Lausanne: Groupe de travail pour les géotopes en Suisse.
- Reynard, E., Coratza, P., et Regolini-Bissig, G. (2009). *Geomorphosites*. München : Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
- Reynard, E., Fontana, G., Kozlik, L., et Fontana, C. (2007). A method for assessing « scientific » and « additional values » of geomorphosites. *Geographica Helvetica*, 62, 148.
- Reynard, E. et Martin, S. (2014). La géomorphologie. In S. Rey-Carron et C. Rey, *Derborence, la nature et les hommes*, Sierre, Monographic, 48-54.
- Rougier, H., et P. Fournier (eds) 2011. *Les hauts de Chamoson*. Lausanne: Ed. Loisirs et Pédagogie.
- Ruban, D. A. (2010). Quantification of geodiversity and its loss. *Proceedings of the Geologists' Association*, 121(3), 326-333.
- Saldaña, A., et Ibáñez, J. J. (2004). Pedodiversity analysis at large scales: an example of three fluvial terraces of the Henares River (central Spain). *Geomorphology*, 62, 123-138.
- Sartori, M. (2014). L'éboulement. In S. Rey-Carron et C. Rey, *Derborence, la nature et les hommes*, Sierre, Monographic, 90-94.
- Savoy, L., Favre, G., et Masotti, D. (2008). Hydrogéologie du karst de Tsanfleuron. In: F. Hobléa, E. Reynard et J.-J. Delannoy (eds). *Karsts de montagne: géomorphologie, patrimoine et ressources*. Collection Edytem, Cahiers de géographie, 7, 135-146.
- Scapozza, C. (2013). *Stratigraphie, morphodynamique, paléoenvironnements des terrains sédimentaires meubles à forte déclivité du domaine périglaciaire alpin*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne. Lausanne, Institut de géographie et durabilité, Géovisions, 40.

- Schlüchter, C. (1988). *The deglaciation of the Swiss Alps: a paleoclimatic event with chronological problems*. *Bull. AFEQ*, 2-3, 141-145.
- Schlüchter, C. et al. (2009). *La Suisse durant le dernier maximum glaciaire (LGM). Carte au 1 : 500 000*. Berne: Swisstopo.
- Schlup, M., Kozlik, L., et Marthaler, M. (2009). *Les Diablerets et le cirque de Derborence*. Consulté à l'adresse http://www.viageoalpina.eu/Via_GeoAlpina_CH/itineraries/10_Anzeindaz-Derborence.pdf
- Schoeneich, P. (1993 a). Cartographie géomorphologique en Suisse. *Cartographie géomorphologique-Cartographie des risques*, 1-13.
- Schoeneich, P. (1993 b). Comparaison des systèmes de légende français, allemand et suisse. *Cartographie géomorphologique-Cartographie des risques*, 15-24.
- Schoeneich, P. (1998). *Corrélation du dernier maximum glaciaire et de la déglaciation alpine avec l'enregistrement isotopique du Groenland*. *Quaternaire*, 9(3), 203-215.
- Schoeneich, P., Reynard, E., et Pierrehumbert, G. (1998). Geomorphological mapping in the swiss alps and prealps. *Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie*, 11, 145-153.
- Seijmonsbergen, A. C., De Jong, M. G., de Graaff, L. W., et Anders, N. S. (2014). *Geodiversität von Vorarlberg und Liechtenstein-Geodiversity of Vorarlberg and Liechtenstein*. Zürich : Bristol-Stiftung. Bern : Haupt.
- Serrano, E. (2002). Geomorphology, natural heritage and protected areas: lines of research in Spain. In *Proceedings of the Workshop on Geomorphological sites: research, assessment and improvement* (p. 27-33).
- Serrano, E., et Ruiz Flaño, P. (2007 a). Geodiversity: concept, assessment and territorial application. The case of Tiermes-Caracena (Soria). *Boletín de la AGE*, 45, 389-393.
- Serrano, E., et Ruiz-Flaño, P. (2007 b). Geodiversity. A theoretical and applied concept. *Geographica Helvetica*, 62(3), 140.
- Serrano, E., Ruiz-Flaño, P., et Arroyo, P. (2009). Geodiversity assessment in a rural landscape: Tiermes-Caracena area (Soria, Spain). *Mem. Descr. Carta Geol. d'It*, 87, 173-180.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423 et 623-656.
- Sharples, C. (1995). Geoconservation in forest management: principles and procedures. *Tasforests*, 7, 37-50.
- Silva, J. P., Pereira, D. I., Aguiar, A. M., et Rodrigues, C. (2013). Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin. *Journal of Maps*, 9(2), 254-262.
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163(688).
- Smith, M. J., Paron, P., et Griffiths, J. S. (2011). *Geomorphological Mapping: Methods and Applications*. Elsevier.
- Spiro, L., Mariétan, I., et Seylaz, L. (1956). *Derborence, histoire de la catastrophe*. Lausanne: Feissly.
- Stanley, M. (2001). Geodiversity strategy. *ProGeo News*, (1), 6-9.

- Stuber, A. (2008). Valeurs naturelles et paysagères : outil d'évaluation. Marche à suivre, indications pour les relevés et l'évaluation. Annexe de la Communication de l'OFEV « Parcs d'importance nationale. Lignes directrices pour la planification, la création et la gestion des parcs ». *L'environnement pratique* no 0802. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Weber, E. (2005). *La source thermale karstique du Chaudron et les sources de la vallée de la Lizerne, Derborence (Valais)*. Neuchâtel: Centre d'hydrogéologie CHYN.
- Xavier-da-Silva, J., et Mendes de Carvalho-Filho, L. (2009). Geodiversity: Some Simple Geoprocessing Indicators to Support Environmental Biodiversity Studies - Directions Magazine. Disponible sur : <http://www.directionsmag.com/articles/geodiversity-some-simple-geoprocessing-indicators-to-support-environmental-/123803> (consulté le 3.04.13).
- Zwoliński, Z. (2004). Geodiversity. In A. Goudie (Ed), *Encyclopedia of Geomorphology, Vol. 1* (pp. 417-418). London : Routledge.
- Zwoliński, Z. (2010). The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. *Landform Analysis*, 11, 77-85.
- Zwoliński, Z., et Stachowiak, J. (2012). Geodiversity map of the Tatra National Park for geotourism. *Quaestiones Geographicae*, 31(1).

11. Annexes

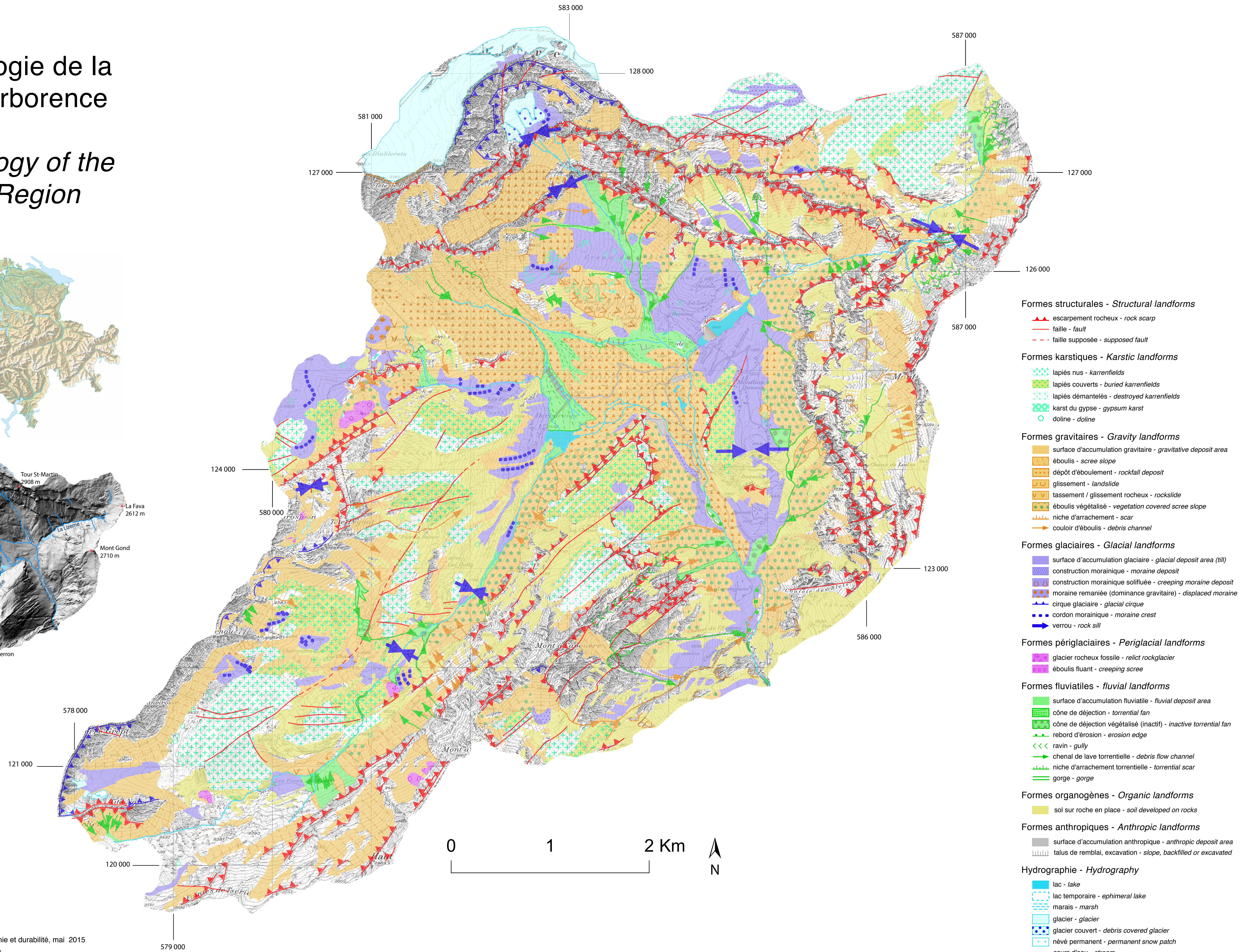
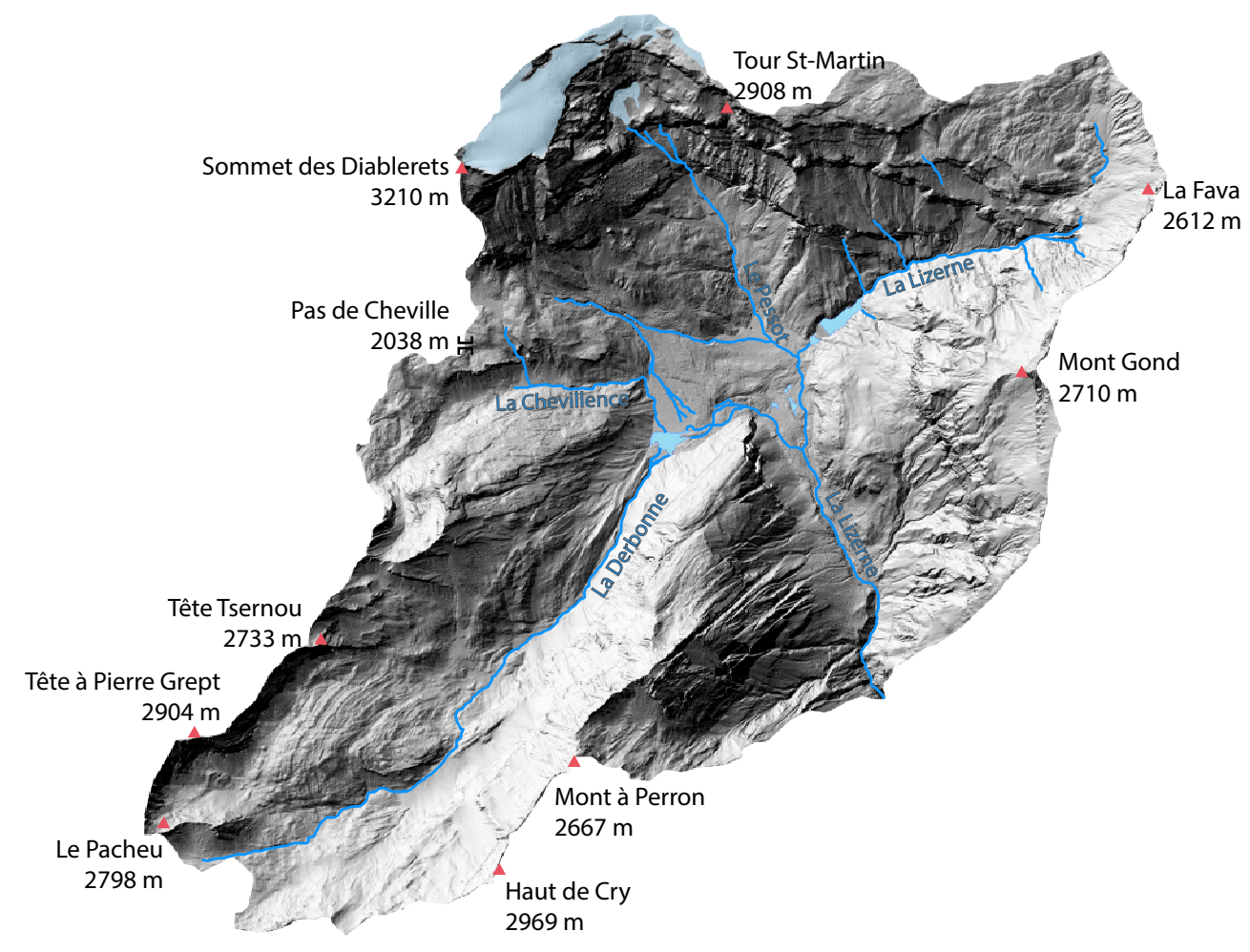
Les documents suivants se trouvent en annexe de ce travail :

- Carte géomorphologique de la région de Derborence – vallée de la Lizerne
- Carte des polygones
- Carte de la diversité géomorphologique de la région de Derborence – vallée de la Lizerne.

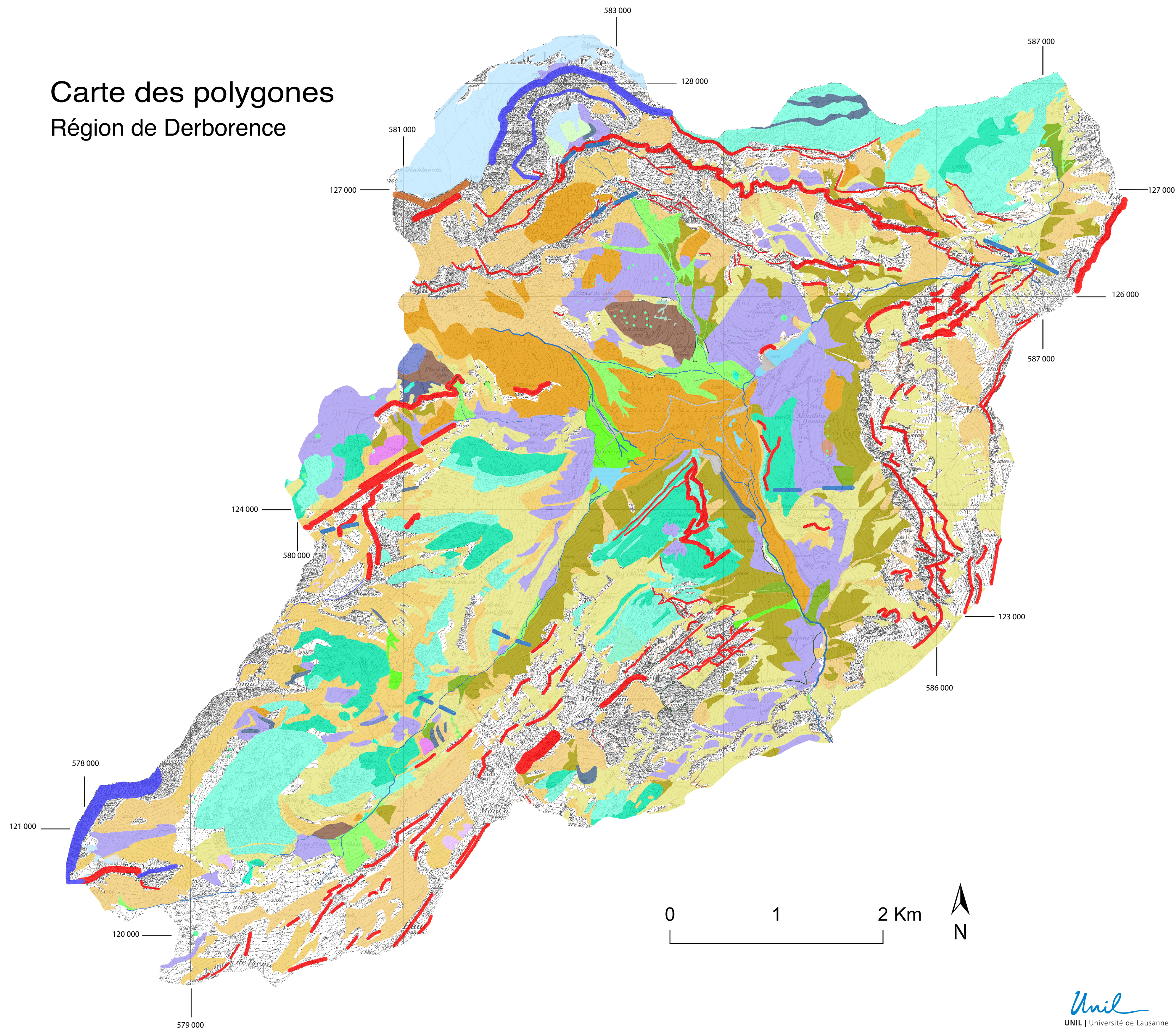
Ces documents sont prévus pour être consultés sous forme imprimée au format A1 pour la carte géomorphologique et A2 pour les deux autres.

Géomorphologie de la région de Derborence

Geomorphology of the Derborence Region

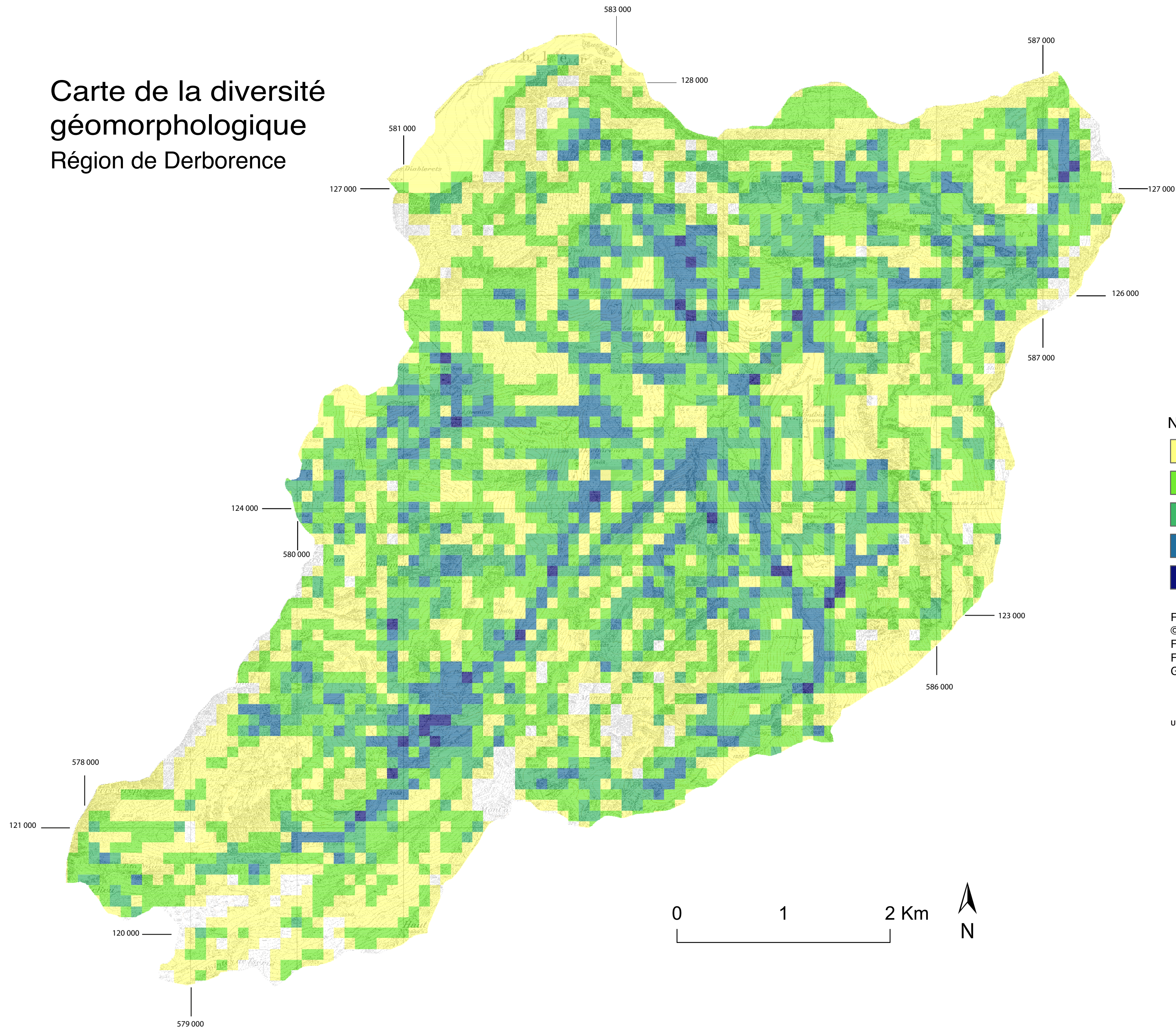


Carte des polygones Région de Derborence

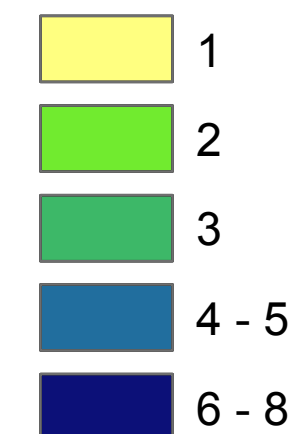


- niche d'arrachement
- couloir d'éboulis
- dépôt d'éboulement
- glissement
- tassement - glissement rocheux
- éboulis végétalisé
- surface d'accumulation gravitaire
- éboulis
- construction morainique
- construction morainique solifluée
- moraine remaniée (dominance gravitaire)
- surface d'accumulation glaciaire
- cirque glaciaire
- cordon morainique
- verrou
- lapiés nus
- lapiés couverts
- lapiés démantelés
- karst du gypse
- doline
- accumulation fluviale
- cône de déjection
- cône de déjection végétalisé (inactif)
- niche d'arrachement torrentielle
- gorge
- ravin
- rebord d'érosion
- rivières
- lac
- lac temporaire
- marais
- glacier
- glacier couvert
- névé permanent
- glacier rocheux fossile
- éboulis fluant
- Escarpement rocheux
- sol sur roche en place
- accumulation anthropique
- talus de remblai, excavation

Carte de la diversité géomorphologique Région de Derborence



Nombre de valeurs uniques



Réalisation : Hélène Maret, mai 2015
© Université de Lausanne, Institut de géographie et durabilité
Fonds : Cartes nationales suisses au 1 : 25000,
Feuilles 1285, 1286 et 1305 datant de 2008
Géodonnées © swisstopo (DV084371)

Unil
UNIL | Université de Lausanne
Institut de géographie
et durabilité