



UNIL | Université de Lausanne  
Faculté des géosciences  
et de l'environnement

## Master of Science in Geography

### Co-évolution entre géomorphologie et écologie sur un cône de déjection de moyenne montagne : le cas du cône des *Larzettes* (Vallon de Nant, VD, Suisse)

Laure Borgeaud

Sous la direction du Prof. S. Lane  
et du Dr. P. Vlttoz

Expert : Prof. E. Verrecchia



Maîtrise universitaire ès sciences en géographie | juin- 2013



Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne | [www.unil.ch/igd](http://www.unil.ch/igd)

Illustration de couverture : Cône des *Larzettes*, Vallon de Nant (VD, Suisse)

Sauf contre-indication, toutes les illustrations sont réalisées par l'auteur.



« We have only just begun to scratch the surface ... »

(Naylor, Viles et Carter, 2002)

## Résumé

La bio-géomorphologie s'intéresse aux multiples interactions entre les composantes biotiques et abiotiques de la surface terrestre. La végétation et les reliefs sont les traits du paysage les plus facilement visibles mais leurs liens de causalité sont complexes et encore mal compris. La présence et la densité de végétation affectent les processus physiques mais ces derniers peuvent s'avérer déterminants pour le développement des écosystèmes. Les cônes de déjection offrent une importante diversité d'activités et se prêtent particulièrement bien à la phyto-géomorphologie. L'âge des surfaces devrait augmenter avec une diminution de la dynamique. L'espace disponible entre les chenaux incisés joue alors un rôle majeur. La diversité peut cependant diminuer dans les milieux trop fermés où les espèces compétitrices réduisent les ressources, c'est pourquoi elle est supposée être maximisée par les perturbations intermédiaires.

Le cône des *Larzettes* (1500 – 1700 m), dans la réserve naturelle du Vallon de Nant (Alpes vaudoises, Suisse), permet d'observer des milieux et perturbations essentiellement exempts d'influence anthropiques. Ce travail met en lien la végétation à divers variables environnementales et pédologiques qui reflètent la dynamique du cône. L'organisation de 100 relevés de 1 m<sup>2</sup> en cinq sections transversales met en évidence les distinctions amont-aval à différentes échelles spatiales. Le groupement des inventaires floristiques révèle sept classes correspondant aux niveaux de développement de la végétation et du sol. Un milieu est attribué à chaque groupe, dont les caractéristiques biotiques et abiotiques diffèrent. La dendrochronologie sur dix *Larix decidua* et la comparaison de photographies aériennes historiques permettent d'estimer l'âge de la stabilisation des surfaces et révèlent l'influence du temps écoulé depuis la dernière perturbation. L'analyse montre également l'importance du développement de la végétation dans les zones actives, contrôlées par l'intensité de l'activité et les interactions à plus large échelle, entre les processus géomorphologiques et la diversité, ainsi que la structure des communautés végétales. L'un des éléments déterminants est la largeur du cône, qui engendre différents niveaux de diversité et de comportements avec l'augmentation d'amont en aval. Ce travail permet d'observer non seulement les liens de causalité, essentiellement entre l'âge et le milieu, mais met également en évidence la co-évolution entre géomorphologie et végétation.

## Abstract

Biogeomorphology focuses on the multiple interactions between biotic and abiotic components on Earth surface. Vegetation and reliefs are the most noticeable features of the landscape but their causal links are complex and still poorly understood. The presence and density of vegetation impact upon physical processes but these latter can also be crucial for the development of ecosystems. Fans and cones offer a wide diversity of activity and are particularly suited to phyto-geomorphology. L'âge des surfaces devrait augmenter avec une diminution de la dynamique. L'espace disponible entre les chenaux incisés joue alors un rôle majeur. La diversité peut cependant diminuer dans les milieux trop fermés où les espèces compétitrices réduisent les ressources, c'est pourquoi elle supposée être maximisée par les perturbations intermédiaires.

On the *Larzettes* fan (1500 – 1700 m), in the nature reserve of *Vallon de Nant* (Vaud Alps, Switzerland), it is possible to observe environments and disturbances essentially free of anthropogenic influences. This paper links vegetation to environmental and soil variables, and so to the fan dynamics. The organisation of 100 stations of 1 m<sup>2</sup> in five transversal sections highlights upstreams-downstreams distinctions at different spatial scales. Analysis of floristic inventories using clustering methods reveals seven groups, corresponding to levels of vegetation and soil development. A floristic environment is assigned to each group, whose biotic and abiotic characteristics differ. Dendrochronology on ten *Larix decidua* and a comparison of historical aerial photographs allows estimation of the time since surface stabilisation. It demonstrates a clear influence of time since last disturbance. However, the analysis also shows the importance of vegetation development within active zones, as controlled by the intensity of activity, as well as larger scale interactions between geomorphic processes and plant communities' diversity and structure. Of critical importance is fan width, which leads to very different levels of diversity and floristic structure as width increases from the fan apex to the fan base. This study not only allows to observe several causality links, especially between age and floristic environment, but highlights the co-evolution between geomorphology and vegetation.

« Il y a des millions d'années que les fleurs fabriquent des épines. Il y a des millions d'années que les moutons mangent quand même les fleurs. Et ce n'est pas sérieux de chercher à comprendre pourquoi elles se donnent tant de mal pour se fabriquer des épines qui ne servent à rien ? Ce n'est pas important la guerre des moutons et des fleurs ? »

(*Le Petit Prince*, A. de Saint-Exupéry)

## Remerciements

Je tiens à remercier les personnes suivantes pour leur l'aide et sans qui ce travail n'aurait pu être achevé:

- Prof. Stuart Lane, mon co-directeur de mémoire, pour ses idées sans limites, sa disponibilité, sa confiance et sa bonne humeur.
- Dr. Pascal Vittoz, mon co-directeur de mémoire, pour ses précieux conseils, ses journées sur le terrain, sa patience et son réalisme.
- Prof. Eric Verrecchia, mon expert, pour son temps et son intérêt.
- L'équipe de l'Auberge du Pont de Nant pour son bon accueil, ses délicieuses assiettes et sa bienveillance.
- Le Service des forêts, de la faune et de la nature du Canton de Vaud pour son autorisation.
- Aurélie Rubin pour les trajets, les débats floristiques et sa présence au Vallon de Nant.
- Natan Micheletti, Nathalie Diaz, Nico Bätz, et Vincent Humphrey pour leurs multiples réponses.
- Paul Bishop, Murielle, Sir William, Nathalie, Nicolas et Dom pour leur visite sur le terrain.
- Les membres de l'institut et les étudiants de master, tout particulièrement Simone.
- Mes parents, mon frère et Gaspard... simplement d'être eux-mêmes et de toujours m'accompagner.

Ainsi que toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin, sans forcément s'en rendre compte, à la réalisation de ce mémoire.



# Table des matières

|  |             |
|--|-------------|
| <b>RESUME</b>  | <b>IV</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>  | <b>V</b>    |
| <b>REMERCIEMENTS</b>   | <b>VII</b>  |
| <b>TABLE DES MATIERES</b>                                      | <b>VIII</b> |
| <b>TABLE DES FIGURES</b>                                       | <b>X</b>    |
| <b>TABLE DES TABLEAUX</b>                                      | <b>X</b>    |
| <b>I PARTIE INTRODUCTIVE</b>                                   | <b>XI</b>   |
| <b>1. RECENTS INTERETS INTERDISCIPLINAIRES</b>                 | <b>XII</b>  |
| <b>2. CONNAISSANCES ACTUELLES</b>                              | <b>XII</b>  |
| <b>3. INTERACTIONS COMPLEXES</b>                               | <b>XIII</b> |
| <b>4. DISTRIBUTION SPATIALE</b>                                | <b>XIV</b>  |
| <b>5. LACUNES PERSISTANTES</b>                                 | <b>XV</b>   |
| <b>6. OBJECTIFS</b>  | <b>XVI</b>  |
| <b>7. STRUCTURE DU TRAVAIL</b>                                 | <b>XVI</b>  |
| <b>II ARTICLE</b>  | <b>19</b>   |
| <b>1. INTRODUCTION</b>   | <b>20</b>   |
| <b>2. TERRAIN D'ETUDE</b>                                      | <b>21</b>   |
| <b>3. METHODES</b>   | <b>23</b>   |
| 3.1. ORGANISATION DES RELEVES                                  | 23          |
| 3.2. REALISATION DES RELEVES                                   | 24          |
| 3.3. DONNEES INVENTORIEES SUR LE TERRAIN                       | 25          |
| 3.4. DONNEES TRAITÉES EN LABORATOIRE                           | 25          |
| 3.5. DONNEES FOURNIES PAR LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) | 26          |
| 3.6. DATATION  | 26          |
| 3.7. ANALYSES STATISTIQUES                                     | 27          |
| 3.8. DEFINITION DES MILIEUX                                    | 28          |
| <b>4. RESULTATS</b>  | <b>28</b>   |
| 4.1. CARACTERISTIQUES ECOLOGIQUES                              | 28          |
| 4.2. CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES                        | 33          |
| 4.3. DATATION  | 35          |

|   |             |
|---|-------------|
| <b>5. DISCUSSION</b>                                  | <b>37</b>   |
| 5.1. DYNAMIQUE AMONT-AVAL                             | 37          |
| 5.2. IMPACTS DES PERTURBATIONS                        | 39          |
| 5.3. CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES DETERMINANTES | 40          |
| <b>6. CONCLUSION</b>                                  | <b>42</b>   |
| <br>  |             |
| <b>III PARTIE CONCLUSIVE</b>                          | <b>XLIV</b> |
| <hr/>   |             |
| <b>1. CONCLUSION</b>                                  | <b>XLV</b>  |
| <b>2. PERSPECTIVES</b>                                | <b>XLV</b>  |
| 2.1. TERRAINS D'ETUDE POTENTIELS                      | XLV         |
| 2.2. DONNEES A ANALYSER EN PHYTO-GEOMORPHOLOGIE       | XLVI        |
| 2.3. METHODES DE DATATION                             | XLVII       |
| 2.4. DIFFERENTES ECHELLES D'ANALYSE                   | XLVIII      |
| <br>  |             |
| <b>IV BIBLIOGRAPHIE</b>                               | <b>L</b>    |
| <hr/>   |             |
| <b>1. LITTERATURE</b>                                 | <b>LI</b>   |
| <b>2. FONDS DE CARTE / MNT</b>                        | <b>LIX</b>  |
| <br>  |             |
| <b>V ANNEXES</b>                                      | <b>LX</b>   |
| <hr/>   |             |

## Table des figures

|  |    |
|--|----|
| Fig 1 : Carte de localisation et délimitation de la zone d'étude : Vallon de Nant, Vaud, Suisse (Fond de carte : Swisstopo). .....           | 23 |
| Fig 2 : Relevés sur les axes factoriels 1 et 2 (gauche) avec correction de l'effet Guttman et 1 et 3 (droite) et appartenance au milieu..... | 29 |
| Fig 3 : Exemple des caractéristiques visuelles pour chaque milieu. ....  | 30 |
| Fig 4 : Localisation des milieux attribués avec la richesse spécifique pour chaque relevé (Fond de carte : Orthophoto 2004, Swisstopo). .... | 32 |
| Fig 5 : Courbes de richesse cumulée par section. ....  | 33 |
| Fig 6 : Relevés sur les axes RDA 1 et 2 (gauche) et 1 et 3 (droite) et appartenance au milieu. ....  | 35 |
| Fig 7 : Localisation des âges estimés par dendrochronologie et photos aériennes historiques (Swisstopo). ....                                | 36 |
| Fig 8 : Age estimé des relevés en fonction de leurs coordonnées sur le premier axe factoriel et appartenance au milieu. ....                 | 37 |

## Table des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tab 1 : Nombre de relevés par sections et types de structures avec leur longueur approximative.....            | 24 |
| Tab 2 : Richesse spécifique par relevé pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum)..... | 29 |
| Tab 3 : Données de recouvrement [%] pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum).....    | 31 |
| Tab 4 : Variables environnementales pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum).....    | 34 |
| Tab 5 : Indices écologiques de Landolt pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum)..... | 35 |



# I Partie introductive

# 1. Récents intérêts interdisciplinaires

La géomorphologie se consacre initialement aux processus purement physiques mais différentes études y intègrent explicitement l'écologie depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (Cowles, 1899). Le vivant est en effet associé au relief, sol, climat et matériel physique de la surface terrestre (Howard et Mitchell, 1985). Il fait ainsi partie des agents géomorphologiques fondamentaux aux échelles locales et régionales (Corenblit et al., 2011). Les termes « *ecogeomorphology* » et « *biogeomorphology* » traduisent tous deux l'influence bidirectionnelle du vivant et du paysage (Wheaton et al., 2011). Généralement utilisés comme synonymes, les deux expressions ne sont pas issues des mêmes intérêts de recherche (Wheaton et al., 2011). La bio-géomorphologie cible essentiellement la désagrégation chimique et physique, ainsi que son amplification ou sa modulation par les réactions biologiques, alors que l'éco-géomorphologie se concentre d'avantage sur les processus d'érosion et de dépôt (Wheaton et al., 2011). Selon Corenblit et al. (2011), la bio-géomorphologie se focalise sur les effets unilatéraux alors que l'éco-géomorphologie considère de manière plus intégrée et interdisciplinaire les liens réciproques entre les processus biotiques et abiotiques. Notamment suite à son explication par Viles en 1988, « *biogeomorphology* » est plus fréquemment employé (Wheaton et al., 2011). La « *géo-écologie* » et l'« *écologie du paysage* » sont des termes largement utilisés, englobant également les multiples relations entre écosystèmes et autres systèmes de la surface terrestre (Naylor et al., 2002). L'échelle spatiale considérée est alors plus large et la dimension humaine souvent incluse (Naylor et al., 2002).

La bio-géomorphologie cherche à mettre en évidence certains aspects des interactions entre processus écologiques et géomorphologiques (Naylor et al., 2002). La récente branche encourage la recherche à l'interface (zone critique) sans contrainte ni dogme, c'est pourquoi elle doit être interdisciplinaire et adaptable (Naylor et al., 2002). La zoo-géomorphologie, terme plus restrictif, analyse l'interface entre animaux et géomorphologie, et la phyto-géomorphologie entre plantes et reliefs (Naylor et al., 2002 ; Garcia-Aguire et al., 2007). Répondant à une réelle audience, les chercheurs sont nombreux à faire des publications concernant la végétation et la géomorphologie (Hession et al., 2010).

# 2. Connaissances actuelles

La végétation recouvre 84% des continents (Corenblit et al., 2011) et participe fortement aux traits du paysage (Howard et Mitchell, 1985). Non seulement elle est aisément visible, mais elle interagit avec les processus physiques. Afin de saisir les reliefs, il est donc important, voire essentiel, de comprendre les couplages et réactions entre plantes et géomorphologie (Murray et Fonstad 2007). Même éparse, la végétation joue un rôle dans les processus d'érosion et de dépôt (Osterkamp et al., 2012). Le rôle stabilisateur du système racinaire est confirmé par de récents travaux (Stoffel et Wilford, 2012). La végétation réduit notamment l'érosion et

améliore le stockage sédimentaire (Viles et al., 2008) mais les relations sont circulaires et entrelacées (Stallins, 2006). Leurs impacts sont divers puisque les dépôts accumulés peuvent fournir un substrat favorable mais qu'une charge trop importante peut également enterrer les espèces présentes (Viles et al., 2008 ; Stoffel et Wilford, 2012).

La distribution de la végétation dépend de nombreux facteurs (Pfeffer et al., 2003) dont la variation peut dépendre de l'échelle spatiale (Dickerson et al., 2012). Les différents climats expliquent en grande partie la répartition des biomes (Saugier, 1996). A des échelles spatiales plus réduites, les espèces dépendent toujours des conditions climatiques (Lacoste et Salanon, 1969 ; Jones, 1980 ; Landolt, 1986 ; Garcia-Aguire et al., 2007), mais également de l'exposition (Pfeffer et al., 2003 ; Yetemen et al., 2010), essentiellement en montagne des régions tempérées, et du rayonnement solaire (Garcia-Aguire et al., 2007). L'altitude est déterminante (Lacoste et Salanon, 1969 ; Pfeffer et al., 2003 ; Yetemen et al., 2010 ; Baroni et al., 2013), ainsi que la granulométrie (Howard et Mitchell, 1985 ; Dickerson et al., 2012) et la pente (Pfeffer et al., 2003) qui y est corrélée (Whipple et al., 1998). De plus, la répartition végétale dépend de la limite de la forêt (Pfeffer et al., 2003 ; Baroni et al., 2013), la limite de la neige (Baroni et al., 2013) et la disponibilité en eau (Garcia-Aguire et al., 2007). Il ne faut pas négliger les caractéristiques pédologiques (Garcia-Aguire et al., 2007), autant chimique que physiques (Lacoste et Salanon, 1969) et l'utilisation des terres (Pfeffer et al., 2003). L'évolution du sol est étroitement liée à celle de la végétation et toute modification d'un élément affecte l'autre (Lacoste et Salanon, 1969). Le rôle de la roche-mère diminue par contre avec les années (Lacoste et Salanon, 1969). Le temps doit donc également être pris en compte (Jones, 1980) puisqu'il y a un lien entre les communautés de plantes et leur âge (Burga et al., 2010 ; Dickerson et al., 2012).

### 3. Interactions complexes

Une perturbation est un trouble ou un désordre mais sa définition reste souvent vague (Johnson et Miyanishi, 2010). Il s'agit d'un événement dans le temps qui modifie les ressources, la disponibilité du substrat, l'environnement physique ou le couvert végétal, et atteint ainsi la structure d'un écosystème, d'une communauté ou d'une population (Pickett et White, 1985). Elle inclut également les fluctuations de l'environnement et les incidents destructeurs qui dépendent des dimensions du système considéré (Pickett et White, 1985). D'origine naturelle ou anthropique (Johnson et Miyanishi, 2010), une perturbation est mesurée en fonction de son intensité et de sa fréquence, toutes deux corrélées négativement (White, 1979 ; Cordonnier, 2004). L'intensité traduit la force du phénomène et la fréquence le nombre d'événements pour une période temporelle (Johnson et Miyanishi, 2010).

Les perturbations touchent une grande variété d'échelles et de systèmes (Pickett et White, 1985) et leurs impacts varient en fonction des caractéristiques de l'agent de perturbation et celles de l'écosystème touché

(Cordonnier, 2004). Roulier (1998) distingue trois types de perturbations selon leurs effets : celles qui rajeunissent, vieillissent et détruisent les milieux. Les événements améliorent la disponibilité de certaines ressources, affectent le processus de succession végétale et initient un retour au stade primaire ou secondaire (Johnson et Miyanishi, 2010). Les perturbations, en rajeunissant les milieux (Randin, 2002), permettent le rétablissement d'espèces colonisatrices en évitant l'emprise par les espèces plus compétitrices (Cordonnier, 2004). Les espèces pionnières nécessitent quant à elles des incidents majeurs afin de se régénérer (Roulier, 1998).

Les perturbations favorisent la diversité des habitats et des communautés végétales (Baroni et al., 2013). Sans rajeunissement, le stade climacique est atteint avec uniquement les espèces compétitrices (Cordonnier, 2004) mais les troubles trop importants sont destructeurs (Stoffel et Wilford, 2012 ; Baroni et al., 2013). L'hypothèse de la perturbation intermédiaire (IDH pour *intermediate disturbance hypothesis*) suppose qu'il y a un stade intermédiaire de fréquence et d'intensité qui maximise la diversité (Connell, 1978). Trop ou pas assez importants, les événements sont néfastes à une importante diversité (Huston, 1979 ; Hughes, 2010).

La relation entre perturbation et diversité est cyclique, à l'instar du lien entre l'œuf et la poule (Hughes, 2010), c'est pourquoi la question n'est pas encore réglée (Huston, 1979). Les interactions sont multiples entre le biotique et l'abiotique. Les écosystèmes peuvent ainsi modérer la magnitude, la fréquence et les impacts des perturbations (Rice et al., 2012). La végétation joue un rôle stabilisateur et réduit l'érosion (Naylor et al., 2002 ; Viles et al., 2008 ; Stoffel et Wilford, 2012), essentiellement les arbres (Descroix et al., 2011) dont la biomasse est grande et profonde (Stoffel et Wilford, 2012). Les perturbations importantes blessent ou détruisent toutefois les plantes et limitent le couvert végétal (Baroni et al., 2013). Naylor et al. (2002) identifient trois actions principales du vivant sur l'environnement physique : la bio-protection, la bio-érosion, la bio-construction. Les deux premiers processus sont essentiellement liés au rôle stabilisateur de la végétation et son système racinaire, alors que la bio-construction concerne les accumulations sédimentaires, notamment causées par les infrastructures des castors. L'environnement physique peut être modifié par les organismes qui construisent des niches écologiques favorables à leur développement (Corenblit et al., 2008). Ce concept récent implique un changement de l'habitat dans le temps et une biodiversité dynamique (Corenblit et al., 2011). Au vu de la complexité des interactions entre les phénomènes vivants et non-vivants (Jones, 1980), un certain nombre de relations s'ajoutent alors aux trois bio-processus dominants (Naylor et al., 2002).

## 4. Distribution spatiale

La répartition spatiale des perturbations dans le paysage n'est pas homogène (Johnson et Miyanishi, 2010). L'ensemble des agents physiques, chimiques et biologiques et des facteurs sociaux qui définissent l'environnement se combinent et induisent les caractéristiques pédologiques et végétales (Clignez, 2004). La

distribution des communautés végétales, intimement liée aux propriétés du paysage (Garcia-Aguire et al., 2007), peut donc servir de phyto-indicateurs d'unités géomorphologiques (Baroni et al., 2013). Les sites comme les zones alluviales s'organisent alors en transition dynamique face au spectre des perturbations hydromécaniques (Roulier, 1998). De plus, les groupements de plantes peuvent être utilisés pour estimer l'âge des dernières perturbations de surface (Dickerson et al., 2012).

Les cônes sont des terrains particulièrement bien adaptés à l'observation de différents stades d'activités. Après leur formation par une série de processus sédimentaires primaires, ils sont affectés par des processus secondaires de moindre intensité mais de fréquence supérieure (Blair et McPherson, 1994). Les interactions entre la végétation, les processus géomorphologiques et le temps sont alors particulièrement visibles (Stoffel et Wilford, 2012). En cas de chenal actif central, l'âge relatif des formes augmente en direction des abords, essentiellement dans les secteurs moyens et inférieurs (Baroni et al., 2013).

Les interactions entre les êtres vivants et les facteurs abiotiques sont variées et dynamiques (Naylor et al., 2002), c'est pourquoi elles sont fréquemment difficiles à déceler (Lacoste et Salanon, 1969). De plus, les conditions d'un milieu résultent de la combinaison complexe de facteurs (Lacoste et Salanon, 1969). Le rôle de phyto-indicateur des communautés végétales reste donc à modérer, surtout que les étapes peuvent changer pour chaque succession primaire progressive (Clignez, 2004). L'ensemble des conditions sont prises en compte par la végétation, d'où la difficulté, voire l'impossibilité, d'isoler les principaux facteurs écologiques (Lacoste et Salanon, 1969).

## 5. Lacunes persistantes

Le relief et la végétation sont les traits du paysage les plus aisément visibles et suscitent un grand intérêt (Howard et Mitchell, 1985). Malgré les nombreuses recherches, la compréhension des liens de causalité entre facteurs biotiques et abiotiques est encore pauvre (Naylor et al., 2002) et l'interface entre géomorphologie et écologie encore lacunaire (Fonstad, 2006). Plus de travaux sont donc nécessaires afin de mieux saisir, voire quantifier, les impacts des processus physiques (Reinhardt et al., 2010), notamment hydro-géomorphologiques (Stoffel et Wilford, 2012). Une meilleure compréhension de l'évolution des paysages passés et récents offre la possibilité de prévoir la réponse écologique des événements futurs, notamment des variations climatiques (Osterkamp et al., 2012). Effectivement, les changements de température, précipitations, composition de l'air, etc. affectent les différentes composantes biotiques et abiotiques du paysage. La géomorphologie et la végétation ne font pas défaut à cette relation au climat (Lacoste et Salanon, 1969 ; Jones, 1980 ; Landolt, 1986 ; Garcia-Aguire et al., 2007) bien que les liens de causalité ne soient pas clairement définis. Les relations multiples doivent être approfondies car la contribution du vivant au paysage n'est pas encore pleinement explorée (Naylor et al., 2002). De plus, les interactions entre perturbations et biodiversité sont complexes et

encore peu connues (Osterkamp et al., 2012). Les différentes lacunes persistantes prouvent ainsi la pertinence d'études intégrées du paysage (Garcia-Aguire et al., 2007). Les processus biotiques et abiotiques peuvent partiellement s'expliquer par différents liens de causalité mais les caractéristiques végétales et géomorphologiques se transforment certainement conjointement, d'où la nécessité de travaux sur leur co-évolution.

## 6. Objectifs

Ce travail vise à mieux comprendre les multiples interactions entre les composantes vivantes et physiques d'un cône de moyenne montagne. Les objectifs peuvent être regroupés en trois parties, à savoir la dynamique géomorphologique, les caractéristiques végétales et les liens qui les unissent.

- Quantifier la **dynamique géomorphologique** d'un cône de moyenne montagne spatialement et temporellement. Il s'agit de mesurer différentes caractéristiques géomorphologiques, topographiques et hydrologiques et d'observer leur distribution amont-aval, ainsi que la transition du chenal actif aux zones stables.
- Etablir les **caractéristiques végétales** de plusieurs endroits d'un cône et leurs variabilités spatiales. Divers inventaires floristiques doivent être effectués afin de distinguer les divers recouvrements et définir les milieux.
- Etablir les **liens entre la dynamique géomorphologique et la biodiversité à plusieurs échelles spatiales**. Les perturbations naturelles, essentiellement hydro-géomorphologiques sur un cône, devraient contribuer à la distribution des espèces végétales et à leur diversité. Un stade de perturbation intermédiaire devrait, de plus, maximiser la diversité. Le rôle des composantes abiotiques peut être calculé afin de définir les plus déterminantes.

## 7. Structure du travail

Ce travail de mémoire est constitué de trois parties distinctes. La première partie introductive situe le cadre théorique de la bio-géomorphologie et présente les objectifs de recherche. La partie centrale contient tous les éléments de la recherche sous forme d'un article d'environ 8000 mots. Ce dernier recense une introduction avec des éléments théoriques plus ciblés, puis reprend les objectifs du travail. Il comprend ensuite la présentation du terrain d'étude, les méthodes, les résultats, la discussion et la conclusion. La dernière partie, conclusive, reprend les grandes lignes de l'article et propose essentiellement des perspectives. Les

bibliographies du travail général et de l'article sont agrégées afin d'éviter les répétitions. La partie article se termine ainsi par la conclusion mais ses références sont disponibles suite à la partie conclusive. Les annexes fournissent les données brutes et les valeurs jugées nécessaires à la compréhension du document. Un format informatique des relevés et statistiques peut être demandé.





## II Article

# 1. Introduction

La vie et le relief ne peuvent être traités séparément (Reinhardt et al., 2010) mais les relations qui les affectent sont complexes (Corenblit et al., 2008). Les processus géomorphologiques façonnent la distribution biotique alors que les êtres vivants modifient leur environnement (Stallins, 2006). Certaines espèces parviennent à construire des niches écologiques favorables à leur développement, ce qui implique un changement d'habitat (Corenblit et al., 2011). Les perturbations abiotiques affectent cependant les milieux qui vieillissent, rajeunissent ou sont détruits (Roulier, 1998). Une réelle co-évolution touche ainsi les processus géomorphologiques et les composantes vivantes (Corenblit et al., 2008). Quantifier l'action d'un individu ou d'une espèce peut s'avérer relativement aisé mais l'augmentation de l'échelle à l'action d'une communauté est un réel défi (Naylor et al., 2002). De plus, le temps doit également être considéré dans un changement d'échelle (Naylor et al., 2002).

Une série de processus sédimentaires primaires permettent le développement de cônes, comme les chutes de blocs, avalanches rocheuses, glissements gravitaires, laves torrentielles, ruissellements en nappe et inondations de chenaux incisés (Blair et McPherson, 1994). Ces dépôts sont dès lors affectés par des processus secondaires de moindre intensité mais de fréquence supérieure, notamment le ruissellement, l'érosion éolienne, la bio-turbation, le développement du sol, la désagrégation sédimentaire, la création de failles ou la cémentation (Blair et McPherson, 1994). Ces processus secondaires, qui agissent en conditions normales, dominent à la surface malgré leur influence réduite dans la construction des cônes (Blair et McPherson, 1994). Leur morphologie dépend notamment de l'évolution du système torrentiel dans le temps (Garitte et al., 2007). Les cônes de déjection relient les bassins versants torrentiels à la rivière en aval et constituent une clé de la cascade sédimentaire (Rice et al., 2012 ; Stoffel et Woldford, 2012). Ces formes d'accumulations fluviales, qui résultent de la rupture de pente (Veyret et Vigneau, 2004), interagissent avec la rivière principale en aval par les modifications de charge sédimentaire et du niveau de base (Garitte et al., 2007). L'alimentation épisodique (Harvey, 2013 ; Stoffel et al., 2013) et la variation des flux liquides et solides causent des ajustements géomorphologiques (Garitte et al., 2007). Les cônes de déjection sont alors touchés par une alternance quasi-cyclique des processus d'aggradation et d'incision (Harvey, 2012).

L'influence des versants sur le système torrentiel diminue d'amont en aval (Garitte et al., 2007). A l'échelle des cônes, la stratigraphie n'est pas homogène, ce qui induit un dépôt également différencié d'amont en aval (Viseras et al., 2003). La forme triangulaire des accumulations implique des variations importantes de surface disponible aux abords du chenal actif et des caractéristiques d'écoulement différentes (Millard et al., 2010). En amont, le chenal est plus confiné et concentre toute l'alimentation du système torrentiel alors qu'en aval, le réseau de chenaux se complexifie avec une répartition plus diffuse des flux.

La mosaïque de stades d'activité observables sur un cône reflète les interactions complexes qui lient la végétation, les processus géomorphologiques et le temps (Stoffel et Wilford, 2012). La multitude d'habitats favorise l'établissement de milieux différents (Baroni et al., 2013) qui s'organisent en transitions dynamiques face aux perturbations hydromécaniques, notamment dans les zones alluviales (Roulier, 1998). Les espèces pionnières et colonisatrices peuvent occuper les zones récemment touchées alors que les sites stables sont dominés par les espèces compétitrices (Randin, 2002 ; Cordonnier, 2004 ; Dickerson et al., 2012). Le dernier stade de développement, appelé climax, est potentiellement empêché par les événements hydro-géomorphologiques (Codronnier, 2004). L'âge relatif des formes augmente des zones actives, généralement centrales, aux abords plus stables (Baroni et al., 2013). Les milieux végétaux sont ainsi corrélés à l'âge (Burga et al., 2010 ; Dickerson et al., 2012).

Ces hypothèses permettent d'élaborer trois objectifs pour ce travail:

1. Quantifier la **dynamique géomorphologique** d'un cône de moyenne montagne aux échelles spatiale et temporelle. Il s'agit de mesurer différentes caractéristiques géomorphologiques, topographiques et hydrologiques et d'observer leur distribution amont-aval, ainsi que la transition du chenal actif aux zones stables.
2. Etablir les **caractéristiques végétales** de plusieurs endroits d'un cône et leurs variabilités spatiales. Divers inventaires floristiques doivent être effectués afin de distinguer les divers recouvrements et définir les milieux.
3. Etablir les **liens entre la dynamique géomorphologique et la biodiversité à plusieurs échelles spatiales**. Les perturbations naturelles, essentiellement hydro-géomorphologiques sur un cône, devraient contribuer à la distribution des espèces végétales et à leur diversité. Un stade de perturbation intermédiaire devrait, de plus, maximiser la diversité. Le rôle des composantes abiotiques peut être calculé afin de définir les plus déterminantes.

## 2. Terrain d'étude

Un cône de déjection fournit différents stades d'activité et d'habitats sur une relativement petite surface. La dynamique torrentielle concerne essentiellement les régions de montagne ou de moyennes montagnes. Afin d'étudier les différents milieux phytosociologiques, il est important de travailler sous la limite de la forêt, pouvant varier de 1800 m-s-m sur les versants Nord des Alpes à 2300 m-s-m en région protégée d'Engadine et du Valais (Parc National Suisse, 2013). Un terrain exempt d'activités humaines permet de mieux observer les interactions entre les processus physiques et vivants, c'est pourquoi la Réserve Naturelle du Vallon de Nant semble adaptée à une telle étude.

Le Vallon de Nant se situe dans les Alpes vaudoises, au Sud-Ouest de la Suisse. Très encaissé par divers sommets supérieurs à 2500 m, il mesure environ 13 km<sup>2</sup> pour 6.5 km de long. Sa protection débuta en 1896 pour la faune grâce à la création du District franc fédéral du Grand Muveran (Vittoz et Gmür, 2009). Les conditions topographiques peu accueillantes (Dutoit, 1983) intéressaient également le Département militaire fédéral qui voulut y implanter une place d'arme mais le Grand Conseil vaudois accepta la réserve naturelle en 1969 (Vittoz et Gmür, 2009). Ce statut maintient le vallon dans son état naturel (Dutoit, 1983) pour une durée de 100 ans (Randin, 2002). Dès 2000, différents instituts de l'Université de Lausanne en font leur terrain d'étude (Vittoz et Gmür, 2009).

Le climat correspond à « celui du versant occidental des Alpes vaudoises » (Dutoit, 1983). Les précipitations abondantes sont réparties tout au long de l'année avec notamment l'effet de barrage aux courants d'Ouest (Vittoz et Gmür, 2009). La couverture nuageuse s'accroche fréquemment aux hauts sommets et 35 jours par année sont orageux, causant crues soudaines et modifications des rives (Dutoit, 1983). D'importantes quantités de neige s'accumulent de novembre-décembre à avril-mai (Dutoit, 1983) et peuvent persister longtemps au fond du vallon, à l'ombre des hautes parois subverticales, ou en zones d'accumulation des avalanches (Vittoz et Gmür, 2009). Les températures annuelles moyennes varient entre 6°C à Pont de Nant et -2°C sur les sommets avoisinants les plus élevés (Vittoz et Gmür, 2009).

Le Vallon de Nant est localisé dans le flanc inverse de la nappe de Morcles (Badoux, 1972 ; Schlup et al., 2009), de l'Helvétique (Badoux, 1971). Ses roches sont d'origine sédimentaire, essentiellement des calcaires déposés entre le Dogger (env. 175-161 millions d'années) et l'Eocène (env. 55-33 millions d'années) (Badoux, 1972). Suite à divers processus récents, les dépôts Quaternaires recouvrent cependant la majeure partie du vallon (Dutoit, 1983 ; Vittoz et Gmür, 2009).

La végétation du Vallon de Nant s'étend de l'étage montagnard au début de l'étage nival (Vittoz et Gmür, 2009). En effet, les 1800 m de dénivellation entre Pont de Nant et les sommets, auxquels s'ajoutent diverses orientations et formes géomorphologiques, offrent une grande diversité d'habitats (Vittoz et Gmür, 2009).

Le cône des *Larzettes*, constitué d'alluvions (Badoux, 1971 ; Dutoit, 1983), se situe en rive droite de l'Avançon de Nant au pied de la Pointe d'Aufalle (2725 m). Globalement orienté au Nord-Ouest, il est fréquemment ombragé par les hautes parois qui le surplombent à l'Est. Dutoit (1983) y cartographie essentiellement de *Epilobion fleischeri*, ainsi que des stades pionniers de pelouses parsemés de *Larix decidua*. Deux buttes en aval du cône sont recouvertes de lande subalpine avec d'avantage de mélèzes et rhododendrons (Dutoit, 1983).

Le terrain d'étude n'englobe pas tout le cône afin d'inclure essentiellement des perturbations naturelles, avant tout hydro-géomorphologiques. Le chenal actif en bordure droite dépend des précipitations et de la fonte. Le chemin en aval marque la frontière inférieure, laissant de côté les surfaces les plus intensivement pâturées. Les

abords du cône sont délimités par les deux chenaux largement incisés de part et d'autre. La surface considérée, comprise entre 1500 et 1700 m, mesure ainsi un peu moins de 170 000 m<sup>2</sup> (Fig 1).

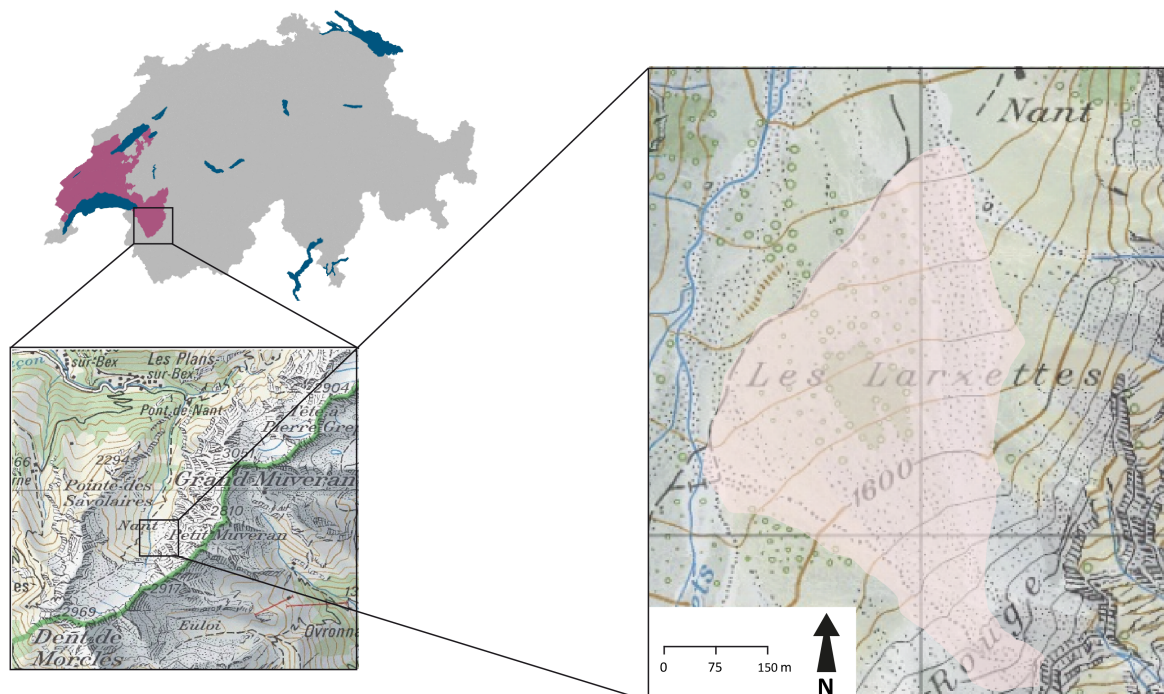


Fig 1 : Carte de localisation et délimitation de la zone d'étude : Vallon de Nant, Vaud, Suisse (Fond de carte : Swisstopo).

### 3. Méthodes

Le statut de réserve du Vallon de Nant interdit toute atteinte portée au site, ce qui peut limiter différentes méthodes. Afin d'obtenir des données cohérentes, le nombre de relevés, leur taille et leur emplacement nécessitent une première investigation par photographies aériennes. Différentes caractéristiques biotiques et abiotiques sont recensées sur le terrain, par modèle numérique de terrain (MNT) ou suite à des analyses en laboratoire. Le traitement statistique permet d'obtenir des résultats et de les confronter à l'âge. Ce dernier est estimé par comparaison de photographies aériennes et dendrochronologie.

#### 3.1. Organisation des relevés

Sur un cône de déjection, les phases dynamiques sont fréquentes et disparates, c'est pourquoi différents stades de succession se rencontrent (Stoffel et Wilford, 2012) sur une échelle géographique réduite. Des

relevés de 1 m<sup>2</sup> sont appropriés pour recenser les espèces présentes dans un milieu tout en respectant l'homogénéité géomorphologique (Lacoste et Salanon, 1969). Afin de distinguer d'éventuelles différences amont-aval, il est important de ranger les relevés en sections.

Un total de 100 relevés est réparti sur cinq sections. Le nombre de relevés par sections est défini par leur longueur, avec un minimum de quinze relevés jugés nécessaires. Malgré la limitation du bétail dans la réserve naturelle, la végétation de la partie inférieure est certainement très influencée par le pâturage des vaches, c'est pourquoi la section A est légèrement négligée par rapport aux autres et ne compte que douze inventaires.

| Section      | Nombre de relevés/section | Longueur/section | Cailloux          |            | Végétation basse  |            | Arbustes épars    |            | Forêt             |            |
|--------------|---------------------------|------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
|              |                           |                  | [m <sup>2</sup> ] | [m]        | [m <sup>2</sup> ] | [m]        | [m <sup>2</sup> ] | [m]        | [m <sup>2</sup> ] | [m]        |
| A            | 12                        | 550              | 1                 | 70         | 2                 | 120        | 9                 | 360        | 0                 | 0          |
| B            | 32                        | 470              | 4                 | 50         | 10                | 170        | 8                 | 80         | 10                | 170        |
| C            | 26                        | 350              | 6                 | 90         | 9                 | 110        | 11                | 150        | 0                 | 0          |
| D            | 15                        | 125              | 5                 | 15         | 5                 | 50         | 5                 | 60         | 0                 | 0          |
| E            | 15                        | 70               | 4                 | 20         | 9                 | 40         | 2                 | 10         | 0                 | 0          |
| <b>Total</b> | <b>100</b>                | <b>1 565</b>     | <b>20</b>         | <b>245</b> | <b>35</b>         | <b>490</b> | <b>35</b>         | <b>660</b> | <b>10</b>         | <b>180</b> |

Tab 1 : Nombre de relevés par sections et types de structures avec leur longueur approximative.

Afin de considérer l'ensemble des milieux, quatre types de structures sont identifiées sur la base d'une photographie aérienne récente : (1) cailloux ; (2) végétation basse ; (3) arbustes épars et (4) forêt. Le nombre de relevés par stade de développement est défini arbitrairement en tenant compte de la longueur qu'il concerne (Tab 1). Un espacement constant permet de définir aléatoirement leur emplacement sur le terrain, sans *a priori* sur l'appartenance aux milieux. En cas de morphologie particulière, comme un chenal et une levée, chaque situation est inventoriée.

### 3.2. Réalisation des relevés

Les sections sont nommées de A à E, d'aval en amont, et les relevés sont numérotés à partir du chenal actif, soit du NNE au SSW. Les sections sont déterminées à la boussole avec une orientation NNE-SSW. Les relevés sont dès lors localisés par des espacements définis, mesurés avec une chevillière de 60 m. Deux double-mètres pliés à angle droit délimitent aisément une surface de 1 m<sup>2</sup>, systématiquement photographiée avant l'inventaire.

### 3.3. Données inventoriées sur le terrain

Les études de terrain ont été effectuées de fin juillet à début septembre 2013. Le dGPS permet de saisir les coordonnées de chaque relevé, daté et décrit, avec une précision approximée à +/- 10 cm (Remerciements à N. Micheletti).

Pour la composition floristique, chaque espèce présente est recensée par son nom latin. Le coefficient de Braun-Blanquet utilisé associe abondance et dominance mais comporte une part de subjectivité pouvant fausser son estimation (Walter, 2006a). Les recouvrements (1) d'arbres, (2) d'arbustes, (3) d'herbes, (4) de mousses/lichens, (5) de sol nu, (6) de cailloux/rochers, et (7) de litière sont également estimés en pourcentage. Les arbustes comprennent les individus de 50 cm à 6 m alors que les arbres sont plus hauts. Le sol nu comprend la matière minérale de diamètre inférieur à 2 mm.

Les indications de granulométrie et profondeur du sol sont mesurées sur le terrain alors qu'un échantillon de sol superficiel est prélevé pour des analyses en laboratoire. La granulométrie est estimée par le diamètre intermédiaire. Cette mesure est faite pour vingt cailloux par relevé, dix tirés aléatoirement et les dix plus gros. La valeur retenue pour les analyses statistiques correspond au diamètre intermédiaire du plus petit des dix plus gros cailloux. La profondeur du sol est également évaluée aléatoirement à dix reprises par relevé. L'utilisation d'une tige métallique ne permet pas toujours de connaître la profondeur totale car la mesure est interrompue par les cailloux enterrés. Pour les analyses statistiques, la profondeur retenue est la valeur maximale des dix prises de mesure.

### 3.4. Données traitées en laboratoire

Les échantillons de sol des 97 relevés présentant suffisamment de matrice fine permettent de mesurer l'humidité résiduelle et la perte au feu à 450°C. Pour garantir un séchage uniforme, tous passent 12h à l'étuve à 45°C (Baize, 2000). Les échantillons sont ensuite tamisés à 2 mm afin d'obtenir une poudre homogène, appelée « terre fine » (Baize, 2000 ; Baize, 2004).

La mesure de l'humidité résiduelle (HR) correspond à une perte de masse après un passage à 105°C par rapport à la terre fine séchée (Baize, 2000). Le pourcentage d'humidité résiduelle est ensuite calculé par :  $HR = [(P_{45^\circ C} - P_{105^\circ C}) / P_{45^\circ C}] * 100$  (où P correspond au poids). Bien qu'il soit influencé par l'humidité ambiante, le pourcentage dépend généralement des taux d'argile et de matière organique (Baize, 2000). Les valeurs inférieures à 1% indiquent un sol sableux peu humifère alors que celles supérieures à 4% témoignent des textures argileuses (Baize, 2000).

La perte au feu (PAF) mesure la perte de poids d'un échantillon après calcination durant 2h par rapport à un poids initial. La température est choisie en fonction des résultats escomptés (Baize, 2000). Le pourcentage de perte au feu à 450°C est calculé par :  $PAF = [(P_{105^{\circ}C} - P_{450^{\circ}C}) / P_{105^{\circ}C}] * 100$  (où P correspond au poids). En milieu calcaire (carbonates de calcium et/ou de magnésium), cette méthode somme le carbone minéral au carbone organique (Baize, 2000). Sur un terrain d'alluvions essentiellement calcaires, il est probable que la part de carbone minéral soit relativement identique pour chaque échantillon. Divers coefficients permettent de calculer le taux de matière organiques (Baize, 2000 ; Moreno et al., 2001) mais il est plus sûr de considérer le carbone mesuré que la matière organique approximée (Baize, 2000).

### 3.5. Données fournies par le modèle numérique de terrain (MNT)

Le modèle numérique de terrain (MNT) fourni par l'Etat de Vaud (2002), avec une précision de 1 m, est parfaitement adapté aux relevés de 1 m<sup>2</sup> de cette étude. Les données permettent d'évaluer la dynamique du cône et le rôle des différentes variables abiotiques.

Le logiciel SIG ArcMap (ESRI ArcGIS<sup>®</sup>) permet d'obtenir pour chaque relevé : (1) l'altitude (m-sur-mer) ; (2) l'ombrage ; (3) l'exposition dans le sens horaire à partir du Nord entre 0 et 359.9° et (4) la courbure dont les valeurs positives indiquent une forme convexe alors que les valeurs négatives indiquent une forme concave. Le logiciel TopoToolBox (Schwanghart et Kuhn, 2010) écrit pour Matlab<sup>®</sup> permet de calculer pour chaque relevé : (5) la pente et (6) l'accumulation de flux (de l'eau), après avoir rempli les dépressions, par méthode de routage de flux multiple (Quinn et al., 1991) avec un coefficient de diffusion de 5 (Remerciements à S. Lane). Le calcul de ces données permet de déterminer (7) l'indice topographique de l'humidité par :  $\ln(\text{accumulation de flux} / \tan(\text{pente}))$  (Kirkby, 1975 ; Gascuel-Odoux et al., 1998).

### 3.6. Datation

L'évolution du Vallon de Nant est observable sur des photographies aériennes de 1957, 1969, 1980, 1992 et 2004 (Swisstopo). Ces ressources sont utiles pour la datation des perturbations, malgré des intervalles relativement espacés entre chaque cliché. Les photographies ortho-rectifiées (Remerciements à N. Micheletti) sont traitées selon quatre classes de recouvrement (Tab 1). Les modifications des surfaces minérales donnent alors une indication sur l'évolution des chenaux et leur âge relatif.

Afin de remonter au-delà de 1957, la dendrochronologie est une méthode adaptée et l'impact du carottage sur le *Larix decidua* est négligeable (Van Mantgem et Stephenson, 2004 ; Wunder et al., 2011). Une autorisation pour dix individus permet de prélever les échantillons le 18 novembre 2012. Les arbres sélectionnés doivent



idéalement être à proximité d'un relevé, sans accumulation sédimentaire en amont du tronc et suffisamment vieux. Neuf individus sont situés le long de la section B alors que le dernier est le plus grand de la zone amont, entre les section D et E. Le carottage est effectué le plus près du sol afin de ne pas sous-estimer l'âge en perdant les premiers cernes de croissance (Desrochers, 1996). Une seule carotte est extraite si possible mais deux sont parfois nécessaires afin d'atteindre le centre de l'arbre. La tarière de Pressler utilisée fait 30 cm et limite ainsi la longueur des carottes. Le ponçage des échantillons de 5 mm de diamètres, collés dans les rainures de planches, facilite le comptage et la lecture des cernes de croissance. La durée d'établissement des arbres devrait être ajoutée aux cernes de croissance mais elle peut fortement varier (Desrochers, 1996). L'âge avancé dans ce cas correspond uniquement au nombre de cernes de croissance.

### 3.7. Analyses statistiques

Le logiciel R<sup>®</sup> est particulièrement bien adapté pour le analyses statistiques de la végétation (Borcard et al., 2011).

L'indice de Shannon-Weaver, fréquemment utilisé, tient compte non seulement du nombre d'espèces présentes dans le relevé mais également du recouvrement relatif de chaque espèce (Vanpeene-Bruhier et al., 1998). Au vu de la faible variation entre les indices, la richesse spécifique est retenue pour les différentes analyses. La courbe de richesse cumulée considère le nombre d'espèces totales répertoriées (en ordonnée) en fonction du nombre de relevés pris en compte (en abscisse) (Vanpeene-Bruhier et al., 1998). Lorsque la courbe plafonne, elle permet notamment de savoir si la taille et le nombre des relevés sont suffisants (Walter, 2006a). L'ordre d'entrée des données d'observations fait fortement varier sa forme (Walter, 2006b)

Pour les analyses statistiques multi-variées, seuls les 91 relevés qui recensent au minimum deux espèces sont pris en compte. Les coefficients d'abondance-dominance sont remplacés par leur rang à partir de 1 pour l'analyse en composante principale (ACP ou PCA), qui nécessite au préalable une transformation de Hellinger (Legendre et Gallagher, 2001). Un code Matlab<sup>®</sup> (Remerciements à E. Verrecchia) permet de corriger l'effet de Guttman entre les axes factoriels 1 et 2 suite à leur redondance (Flament et Milland, 2005).

La matrice de ressemblance nécessaire à la classification des relevés utilise le coefficient de Bray-Curtis. Le dendrogramme est réalisé par *Ward's minimum variance method* (Walter, 2006a), qui minimise la somme des carrés des distances au centroïde de chaque groupe (Borcard et al., 2011). L'analyse discriminante, pondérée par l'abondance moyenne, permet de caractériser les classes. Les valeurs indicatrices des espèces pour les groupes de relevés permettent de repérer les espèces différentielles de ces groupes et de les rattacher aux milieux.

L'analyse canonique de redondance (RDA) permet d'analyser le tableau des espèces sous contrainte des données environnementales (Borcard et al., 2011). Seules dix variables sont traitées suite à la suppression de l'humidité résiduelle pour sa corrélation significative avec la perte au feu à 450°C. De plus, il s'agit de l'eau non accessible par la végétation.

Seuls six des huit indices écologique de Landolt et al. (2010) sont ajoutés le long de axes factoriels (ACP). Au vu de la petite surface d'étude, la variation des indices de continentalité (K) et de température (T) ne traduit pas la réalité. De bonnes indications peuvent toutefois être fournies au niveau superficiel par les indices de réactivité (R) qui estime le pH, d'humidité (F), d'humus (H) qui implique la matière organique, de nutriments (N), de diversité (D) et de lumière (L) (Bütler et Domergue, 1997).

### 3.8. Définition des milieux

Les espèces caractéristiques définissent les différentes unités végétales (Walter, 2006a). Les espèces indicatrices des groupes aident à rattacher les relevés aux milieux suisses selon Delarze et Gonseth (2008).

## 4. Résultats

### 4.1. Caractéristiques écologiques

Parmi les 100 relevés effectués, 91 comptent deux espèces au moins et sont analysés. Au total, 107 espèces sont observées plus d'une fois, dont les plus fréquentes sont *Petasites paradoxus* (75% des relevés), *Calamagrostis varia* (68%) et *Carex sempervirens* (60%). Environ 53% des espèces figurent dans moins de 10% des relevés.

L'analyse en composantes principales (ACP) et le groupement permettent de structurer les données et de constater un important gradient le long du premier axe factoriel. Ce dernier témoigne de la colonisation des surfaces par les plantes et du développement conjoint du sol. Le dendrogramme permet de retenir sept groupes qui se distinguent également sur les graphiques des axes factoriels (Fig 2). En se basant sur les valeurs indicatrices des espèces, les relevés sont rattachés aux milieux (Fig 3) de Delarze et Gonseth (2008). La richesse spécifique par relevé varie fortement selon le milieu attribué (Tab 2).

Les neuf relevés écartés pour l'analyse sont constitués d'alluvion sans végétation. Le groupe 7 est le moins développé, avec une richesse spécifique de seulement trois espèces. Seul *Epilobium fleischeri* est indicatrice, ce

qui indique un *Epilobion fleischeri*. Le groupe 5 ne dispose d'aucune espèce indicatrice mais au vu de l'abondance et de la fréquence des dix-neuf espèces présentes, notamment *Leontodon hispidus*, *Petasites paradoxus* et *Gypsophila repens*, il est possible d'avancer le *Petasion paradoxus*. Le groupe 6 compte peu d'espèces indicatrices et de milieux très divers. L'*Epilobion fleischeri* est retenu au vu de la valeur très importante de *Hieracium staticifolium*.

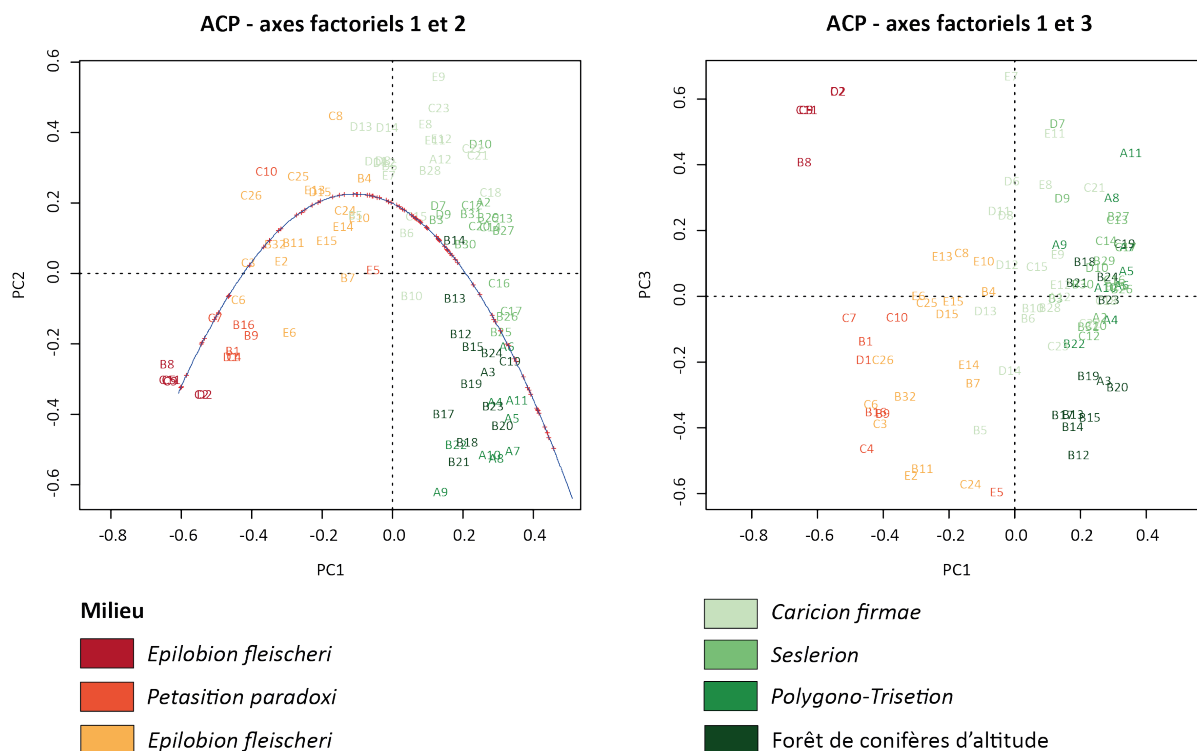


Fig 2 : Relevés sur les axes factoriels 1 et 2 (gauche) avec correction de l'effet Guttman et 1 et 3 (droite) et appartenance au milieu.

| Groupe              |     | 7                           | 5                         | 6                           | 2                      | 3                | 1                         | 4                             |
|---------------------|-----|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Milieu              |     | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Petasion paradoxus</i> | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Caricion firmae</i> | <i>Seslerion</i> | <i>Polygono-Trisetion</i> | Forêt de conifères d'altitude |
| Richesse spécifique | Min | 1                           | 2                         | 5                           | 14                     | 22               | 31                        | 15                            |
|                     | Méd | 2                           | 6                         | 12                          | 17                     | 26               | 37                        | 28                            |
|                     | Max | 3                           | 10                        | 22                          | 25                     | 36               | 45                        | 35                            |

Tab 2 : Richesse spécifique par relevé pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum).

Les groupes 2 et 3 correspondent tous deux aux Pelouses et pâturages maigres d'altitude, à un stade de développement encore précoce. Le groupe 2 est difficile à caractériser avec des espèces du *Caricion firmae* et du *Caricion ferrugineae*. Les valeurs indicatrices élevées de *Dryas octopetala*, *Carex sempervirens* et *Saxifraga paniculata* laissent cependant préférer la première option. Le *Caricion ferrugineae*, qui domine les pentes du Vallon (Vittoz et Gmür, 2009) n'est ainsi affecté à aucun groupe de ce terrain. La présence de *Hieracium villosum* et *Sesleria caerulea* dans le groupe 3 permet de distinguer le *Seslerion*.



D1 - Alluvions sans végétation



E6 - *Epilobion fleischeri* (1)



C10 - *Petasition paradoxi*



E13 - *Epilobion fleischeri* (2)



A12 - *Caricion firmae*



D9 - *Seslerion*



A7 - *Polygono-Trisetion*



B12 - Forêt de conifère d'altitude

Fig 3 : Exemple des caractéristiques visuelles pour chaque milieu.

Le groupe 1 correspond au *Polygono-Trisetion*, avec des parentés aux *Poion alpinae* et *Seslerion*. Une majorité d'espèce du *Polygono-Trisetion* sont effectivement présentes, comme *Campanula rhomboidalis*, *Trollius europaeus* et *Crepis pyrenaica*. Le groupe 4, avec ses nombreux arbres, indique des Forêts de conifères d'altitude mais il est dès lors ardu de distinguer plus précisément le milieu. L'appartenance à l'*Abieti-Piceion* est la plus probable avec la présence d'*Abies alba*, *Vaccinium myrtillus*, *Aposeris foetida* et *Sorbus aucuparia*. Le Mélézin est cependant également possible par sa structure de pâturage boisé dominé par les mélèzes. Le terme général de Forêt de conifère d'altitude est maintenu au vu de sa singularité par rapport aux autres milieux.

Les recouvrements moyens varient entre groupes. Le gradient de développement de la végétation est visible (Tab 3), notamment avec une augmentation des herbes des groupes 7, 5, 6, 2, 3, 4 puis 1. Les rochers et cailloux recouvrent par conséquent toujours moins de terrain dans le même ordre. Les mousses et lichens sont presque absents des groupes 5 et 7 peu développés et d'avantage présents dans les groupes intermédiaires 3, 2 et 6. Les arbres et arbustes sont évidemment concentrés dans la *Forêt de conifères d'altitude* du groupe 4. Le sol nu est plus élevé dans les groupes peu développés 7 et 5 car il comprend la matrice fine déposée dans les chenaux.

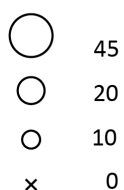
| Groupe             |     | 0                         | 7                           | 5                        | 6                           | 2                      | 3                | 1                         | 4                             |
|--------------------|-----|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Milieu             |     | Alluvions sans végétation | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Petasion paradoxo</i> | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Caricion firmae</i> | <i>Seslerion</i> | <i>Polygono-Trisetion</i> | Forêt de conifères d'altitude |
| Arbres             | Min | 0                         | 0                           | 0                        | 0                           | 0                      | 0                | 0                         | 0                             |
|                    | Méd | 0                         | 0                           | 0                        | 0                           | 0                      | 0                | 0                         | 0                             |
|                    | Max | 0                         | 0                           | 2                        | 0                           | 0                      | 70               | 7                         | 75                            |
| Arbustes           | Min | 0                         | 0                           | 0                        | 0                           | 0                      | 0                | 0                         | 0                             |
|                    | Méd | 0                         | 0                           | 0                        | 0                           | 0.5                    | 0                | 0.1                       | 7                             |
|                    | Max | 0                         | 0                           | 2                        | 5                           | 60                     | 15               | 60                        | 55                            |
| Herbes             | Min | 0                         | 0.01                        | 0.3                      | 3                           | 17                     | 50               | 87.9                      | 30                            |
|                    | Méd | 0                         | 0.1                         | 2                        | 25                          | 50                     | 78               | 91                        | 88                            |
|                    | Max | 0.1                       | 2                           | 25                       | 72                          | 80                     | 93               | 95.9                      | 97.9                          |
| Mousses / Lichens  | Min | 0                         | 0                           | 0                        | 0                           | 1                      | 0                | 0                         | 0                             |
|                    | Méd | 0                         | 0                           | 0                        | 2                           | 5                      | 4                | 1                         | 1                             |
|                    | Max | 0                         | 0                           | 1                        | 16                          | 19                     | 15               | 7                         | 6                             |
| Sol nu             | Min | 0                         | 0                           | 0                        | 0                           | 0                      | 0                | 0                         | 0                             |
|                    | Méd | 1                         | 0.55                        | 1                        | 0                           | 0                      | 0                | 0                         | 0                             |
|                    | Max | 10                        | 30                          | 8                        | 1                           | 2                      | 1                | 5                         | 1                             |
| Rochers / Cailloux | Min | 93.0                      | 69.8                        | 69                       | 18                          | 3                      | 0                | 0                         | 0                             |
|                    | Méd | 98.9                      | 98.3                        | 93.5                     | 69                          | 35                     | 7                | 1                         | 2                             |
|                    | Max | 100                       | 99.98                       | 98.6                     | 96.8                        | 77                     | 40               | 2                         | 10                            |
| Litière            | Min | 0                         | 0                           | 0.1                      | 0.1                         | 1                      | 2                | 3                         | 1                             |
|                    | Méd | 0                         | 0.1                         | 0.6                      | 2                           | 4                      | 6                | 4                         | 3                             |
|                    | Max | 0.1                       | 0.1                         | 25                       | 8                           | 45                     | 40               | 7                         | 65                            |

Tab 3 : Données de recouvrement [%] pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum).

La richesse spécifique n'est pas homogène entre les relevés (Fig 4). Elle présente des variations intra- et inter-sections et montre une cohérence avec le milieu attribué. Effectivement, le développement de la végétation et du sol induit une augmentation du nombre d'espèces par relevé. La richesse spécifique par relevés augmente donc d'amont en aval et en direction du centre du cône selon la répartition géographique des milieux.



### Richesse spécifique



### Milieu

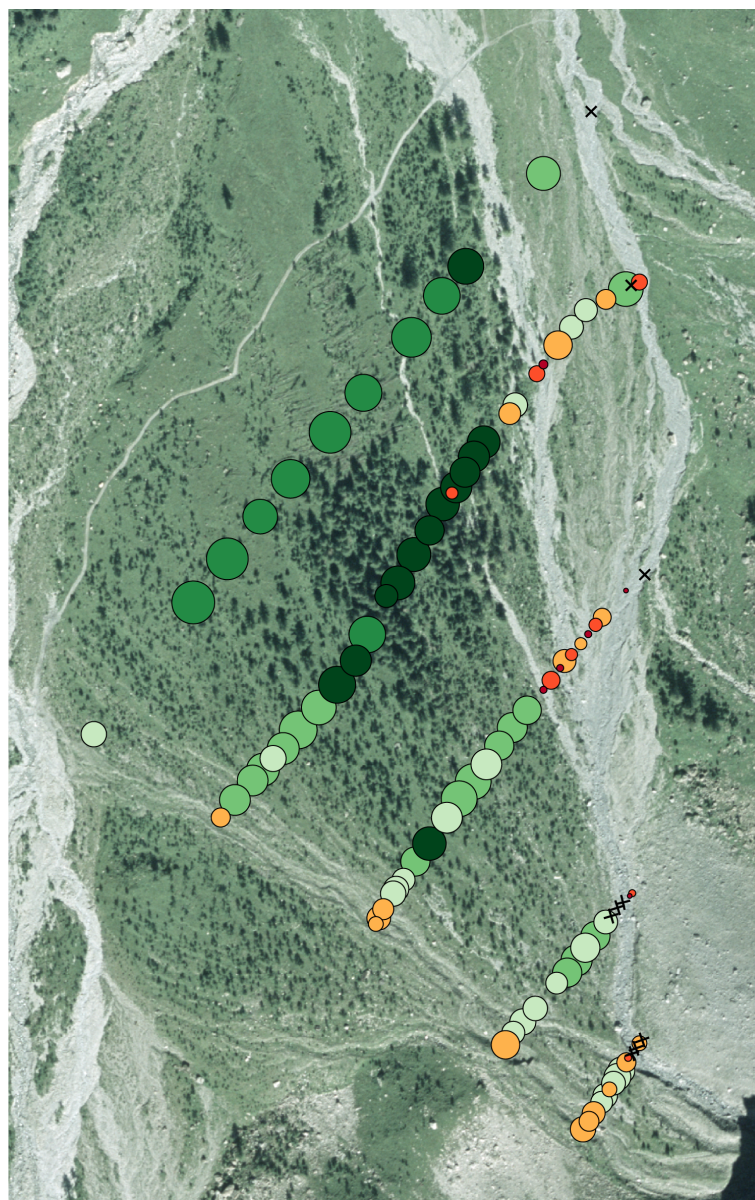
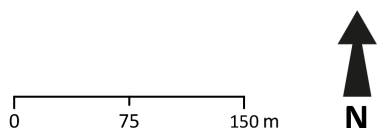
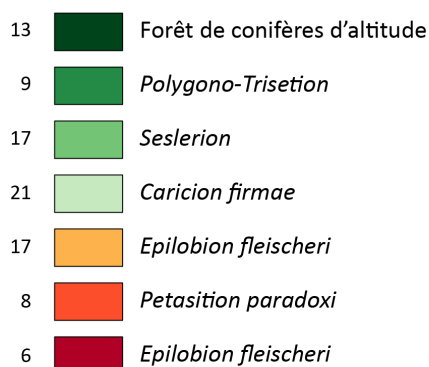


Fig 4 : Localisation des milieux attribués avec la richesse spécifique pour chaque relevé (Fond de carte : Orthophoto 2004, Swisstopo).

La richesse spécifique par section augmente également d'amont en aval (Fig 5). La section A est légèrement en-dessous de la B (98 espèces contre 103) mais pour nettement moins de relevés (12 contre 32). Le nombre d'espèces diminue ensuite avec 69 en section C (26 relevés), 54 en D et 47 en E (15 relevés chacune). Les courbes de richesse cumulée par section (Fig 5) permettent d'observer le nombre de relevés nécessaires pour atteindre la richesse de la section. Le sommet de la courbe est déjà atteint après 10 relevés pour les sections D et E, mais nécessite 15 relevés dans la section C et 30 dans la B. Ainsi plus la richesse spécifique est importante, plus il faut de relevés afin de l'atteindre. La courbe n'étant pas complète pour la section A, l'aval est difficilement caractérisable.

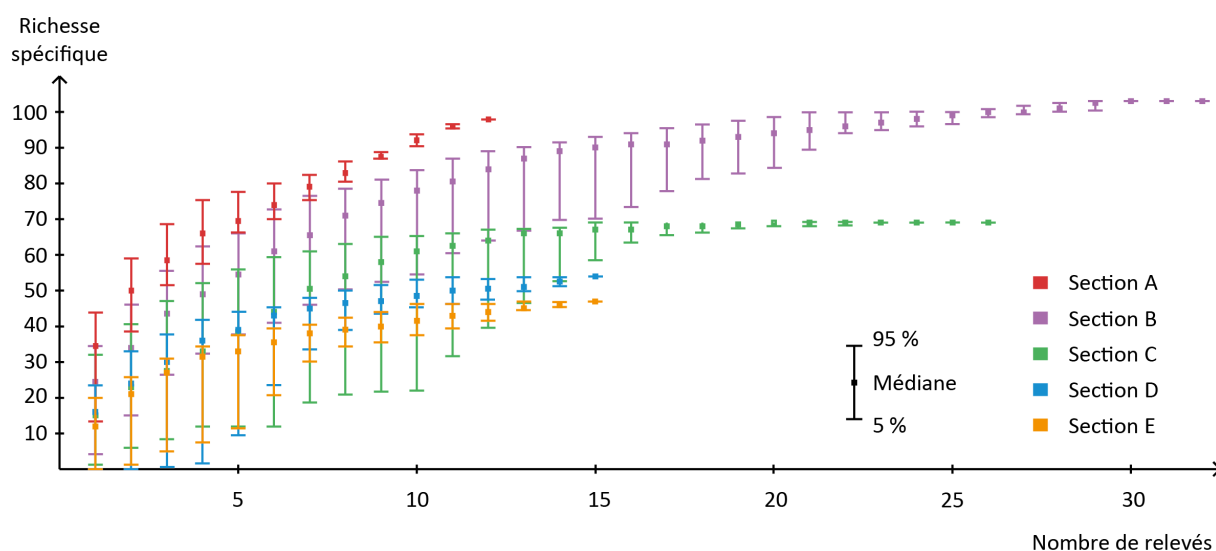


Fig 5 : Courbes de richesse cumulée par section.

## 4.2. Caractéristiques environnementales

A l'échelle du cône des *Larzettes*, plusieurs composantes environnementales varient peu (Tab. 4). L'exposition est essentiellement N à W dans tous les groupes. La différence d'altitude entre le relevé le plus haut (E9 à 1666.8 m) et le plus bas (A1 à 1528.8 m) ne suit pas clairement l'ordre du développement de la végétation, malgré une concentration des groupes les plus développés dans la partie inférieure. La courbure témoigne d'un relief globalement peu accidenté. Les groupes actifs sont essentiellement plats à convexes, les groupes intermédiaires 3, 2 et 6 concaves et les milieux bien développés des groupes 1 et 4 sont convexes.

La granulométrie est grossière dans les relevés actifs, et diminue avec le développement de la végétation et du sol. Les diamètres intermédiaires maximaux se rencontrent dans le groupe 5. L'accumulation de flux est également élevée dans les parties minérales, passant d'une alimentation de plusieurs dizaines de milliers de  $m^2$  dans les relevés actifs, à quelques  $m^2$  dans les secteurs de végétation dense.

La profondeur du sol augmente avec le développement des milieux. Le groupe 5 présente cependant une valeur élevée, expliquée par l'importance de la matrice fine. Le pourcentage de carbone, ainsi que l'humidité résiduelle supprimée pour les analyses statistiques, augmentent nettement avec le développement du couvert végétal et atteignent leur maximum dans les Forêts de conifère d'altitude.

Le gradient de développement des milieux est visible sur l'axe principal de la RDA (Fig 6). Les milieux peu développés sont globalement affectés par les conditions extérieures, essentiellement l'altitude sur l'axe principal mais également l'exposition et l'ombrage. Les milieux plus développés et âgés dépendent par contre des caractéristiques pédologique, notamment la profondeur du sol et la courbure.

| Groupe  |     | 0                         | 7                           | 5                        | 6                           | 2                     | 3                | 1                         | 4                             |
|---|-----|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Milieu  |     | Alluvions sans végétation | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Petasion paradoxi</i> | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Caricion firmæ</i> | <i>Seslerion</i> | <i>Polygono-Trisetion</i> | Forêt de conifères d'altitude |
| Altitude [m]                                    | Min | 1523.9                    | 1550.5                      | 1542.0                   | 1543.3                      | 1543.4                | 1528.8           | 1539.5                    | 1536.7                        |
|   | Méd | 1634.4                    | 1590.5                      | 1588.9                   | 1612.5                      | 1637.2                | 1597.3           | 1553.3                    | 1566.9                        |
|   | Max | 1663.3                    | 1632.7                      | 1664.3                   | 1665.8                      | 1666.8                | 1641.3           | 1576.9                    | 1608.1                        |
| Exposition [°]                                  | Min | 10.9                      | 5.7                         | 12.8                     | 1.1                         | 13.9                  | 0.7              | 20.1                      | 15.9                          |
|   | Méd | 264.0                     | 322.8                       | 291.5                    | 297.7                       | 310.4                 | 309.9            | 270.9                     | 315.8                         |
|   | Max | 347.2                     | 350.2                       | 341.9                    | 355.7                       | 349.6                 | 353.9            | 347.0                     | 336.2                         |
| Courbure [/100]                                 | Min | -0.6                      | -0.2                        | -0.33                    | -1.7                        | -0.86                 | -1.1             | -0.6                      | -0.3                          |
|   | Méd | -0.3                      | -0.03                       | -0.05                    | -0.06                       | -0.08                 | -0.05            | 0.3                       | 0.1                           |
|   | Max | 0.3                       | 0.41                        | 0.74                     | 0.29                        | 0.5                   | 0.37             | 0.9                       | 0.5                           |
| Ombrage   | Min | 178                       | 190                         | 192                      | 174                         | 171                   | 191              | 171                       | 179                           |
|   | Méd | 200                       | 210.5                       | 210.5                    | 208                         | 215                   | 210              | 201                       | 211                           |
|   | Max | 231                       | 228                         | 220                      | 233                         | 250                   | 243              | 216                       | 230                           |
| Granulométrie [cm]                              | Min | 4.5                       | 6.0                         | 5.5                      | 4.0                         | 2.0                   | 0.0              | 0.0                       | 0.0                           |
|   | Méd | 8.0                       | 7.8                         | 9.0                      | 7.0                         | 5.5                   | 5.0              | 4.0                       | 5.0                           |
|   | Max | 17.0                      | 11.0                        | 13.0                     | 13.5                        | 9.0                   | 22.0             | 8.5                       | 13                            |
| Profondeur du sol [cm]                          | Min | 0.0                       | 0.0                         | 4.0                      | 0.0                         | 0.0                   | 5.0              | 4.8                       | 5.7                           |
|   | Méd | 4.4                       | 4.8                         | 8.8                      | 6.1                         | 6.6                   | 7.0              | 9.8                       | 8.5                           |
|   | Max | 13.0                      | 8.7                         | 27.5                     | 16.5                        | 12.2                  | 17.5             | 14.5                      | 18.5                          |
| Perte au feu 450°C [%]                          | Min | 0.0                       | 0                           | 0.4                      | 0.0                         | 0.7                   | 2.1              | 21.8                      | 8.8                           |
|   | Méd | 0.3                       | 0.4                         | 0.5                      | 1.2                         | 11.5                  | 24.7             | 26.1                      | 35.0                          |
|   | Max | 0.4                       | 0.7                         | 2.9                      | 7.7                         | 49.0                  | 45.5             | 47.8                      | 72.2                          |
| Indice topographique [m <sup>2</sup> /gradient] | Min | 0.0                       | 3.2                         | 0.4                      | 0.5                         | 0.2                   | 0.1              | 0.5                       | -0.2                          |
|   | Méd | 8.5                       | 7.8                         | 3.7                      | 3.2                         | 2.5                   | 3.7              | 2.1                       | 4.2                           |
|   | Max | 10.2                      | 10.5                        | 6.9                      | 12.0                        | 10.1                  | 8.5              | 5.5                       | 8.6                           |
| Accumulation de flux [m <sup>2</sup> ]          | Min | 1.1                       | 10.6                        | 1.0                      | 1.0                         | 1.0                   | 1.0              | 1.2                       | 1.0                           |
|   | Méd | 1275.5                    | 753.4                       | 31.6                     | 11.1                        | 8.1                   | 19.5             | 3.3                       | 27.6                          |
|   | Max | 10423.5                   | 16226.0                     | 374.7                    | 39320.0                     | 8640.1                | 1431.4           | 77.1                      | 2844.2                        |
| Pente [gradient]                                | Min | 0.3                       | 0.2                         | 0.4                      | 0.3                         | 0.2                   | 0.1              | 0.3                       | 0.3                           |
|   | Méd | 0.5                       | 0.4                         | 0.6                      | 0.7                         | 0.7                   | 0.4              | 0.4                       | 0.5                           |
|   | Max | 1.1                       | 0.5                         | 0.8                      | 1.2                         | 1.0                   | 1.0              | 0.8                       | 1.3                           |
| Humidité résiduelle [%]                         | Min | 0.0                       | 0.0                         | 0.2                      | 0.0                         | 0.2                   | 0.4              | 3.3                       | 1.4                           |
|   | Méd | 0.2                       | 0.2                         | 0.2                      | 0.4                         | 1.9                   | 3.3              | 4.1                       | 4.8                           |
|   | Max | 0.2                       | 0.3                         | 0.7                      | 1.4                         | 8.9                   | 7.4              | 6.6                       | 8.5                           |

Tab 4 : Variables environnementales pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum).

Les indices de Landolt (Tab 5) ne concernent pas le milieu sans végétation. Les nutriments (N) et d'humidité (F) sont relativement stables autour de 3. La diminution de la réactivité (R) avec le développement de la végétation traduit une acidification du sol, toutefois peu importante avec des moyennes par relevé supérieures à 3. L'humus (H) augmente également dans ces milieux, avec son maximum dans la forêt. La dispersité (D), liée à l'aération (Bütler et Domergue, 1997), diminue en milieu fermé, tout comme la lumière (L).



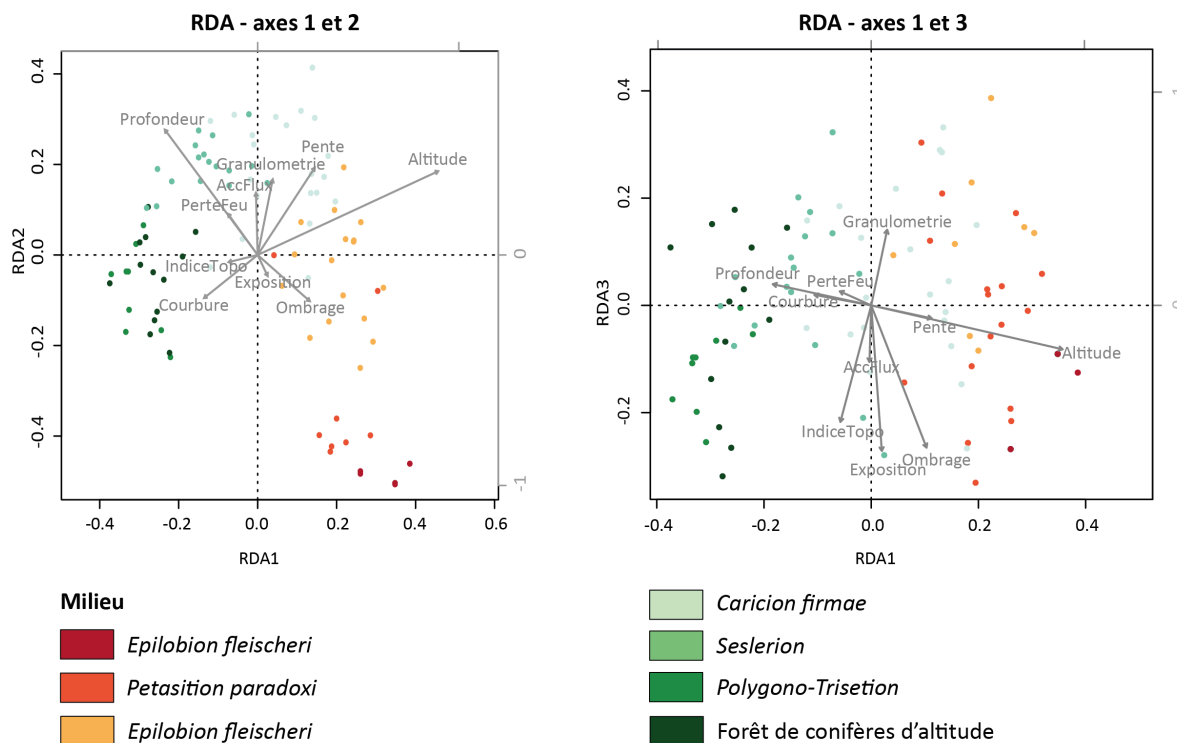


Fig 6 : Relevés sur les axes RDA 1 et 2 (gauche) et 1 et 3 (droite) et appartenance au milieu.

| Groupe          |     | 7                           | 5                          | 6                           | 2                      | 3                | 1                         | 4                             |
|-----------------|-----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Milieu          |     | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Petasition paradoxi</i> | <i>Epilobion fleischeri</i> | <i>Caricion firmae</i> | <i>Seslerion</i> | <i>Polygono-Trisetion</i> | Forêt de conifères d'altitude |
| D<br>Dispersité | Min | 3.0                         | 2.6                        | 1.9                         | 2.4                    | 2.6              | 1.8                       | 1.9                           |
|                 | Méd | 3.2                         | 3.0                        | 2.8                         | 3.0                    | 2.7              | 2.3                       | 2.5                           |
|                 | Max | 5.5                         | 4.0                        | 3.7                         | 3.7                    | 3.0              | 2.4                       | 3.0                           |
| F<br>Humidité   | Min | 3.4                         | 2.8                        | 2.6                         | 2.5                    | 2.6              | 2.7                       | 2.6                           |
|                 | Méd | 3.6                         | 3.3                        | 3.0                         | 2.6                    | 2.8              | 2.9                       | 3.0                           |
|                 | Max | 3.8                         | 3.8                        | 3.5                         | 3.0                    | 3.0              | 3.2                       | 3.3                           |
| H<br>Humus      | Min | 1.0                         | 1.0                        | 1.5                         | 2.2                    | 2.6              | 3.1                       | 2.6                           |
|                 | Méd | 1.0                         | 1.8                        | 2.4                         | 2.5                    | 2.9              | 3.3                       | 3.1                           |
|                 | Max | 1.0                         | 2.4                        | 2.8                         | 3.0                    | 3.1              | 3.4                       | 4.0                           |
| L<br>Lumière    | Min | 4.4                         | 3.6                        | 3.5                         | 3.7                    | 3.7              | 3.4                       | 2.8                           |
|                 | Méd | 4.5                         | 4.4                        | 3.9                         | 4.0                    | 3.9              | 3.6                       | 3.6                           |
|                 | Max | 5.0                         | 5.0                        | 4.3                         | 4.2                    | 4.1              | 3.7                       | 3.8                           |
| N<br>Nutriments | Min | 2.4                         | 2.2                        | 2.1                         | 2.0                    | 2.2              | 2.2                       | 2.4                           |
|                 | Méd | 2.5                         | 2.5                        | 2.3                         | 2.2                    | 2.2              | 2.5                       | 2.5                           |
|                 | Max | 3.0                         | 3.0                        | 2.8                         | 2.4                    | 2.4              | 3.1                       | 2.8                           |
| R<br>Réactivité | Min | 4.0                         | 3.6                        | 3.9                         | 3.6                    | 3.5              | 3.3                       | 3.1                           |
|                 | Méd | 4.0                         | 4.1                        | 4.0                         | 3.9                    | 3.8              | 3.4                       | 3.5                           |
|                 | Max | 4.0                         | 4.5                        | 4.4                         | 4.1                    | 4.1              | 3.6                       | 3.8                           |

Tab 5 : Indices écologiques de Landolt pour chaque milieu (Min = minimum ; Méd = médiane ; Max = maximum).

### 4.3. Datation

Les orthophotos de 1957, 1969, 1980, 1992 et 2004 permettent d'observer l'évolution du cône et de la végétation. Le couvert forestier est à son maximum en 1992, avant la perturbation qui a couché de nombreux arbres à l'aval du cône, aux alentours de la section A. Les communautés herbacées sont par contre plus étendues en 2004, notamment sur les parties extérieures du cône et en amont.

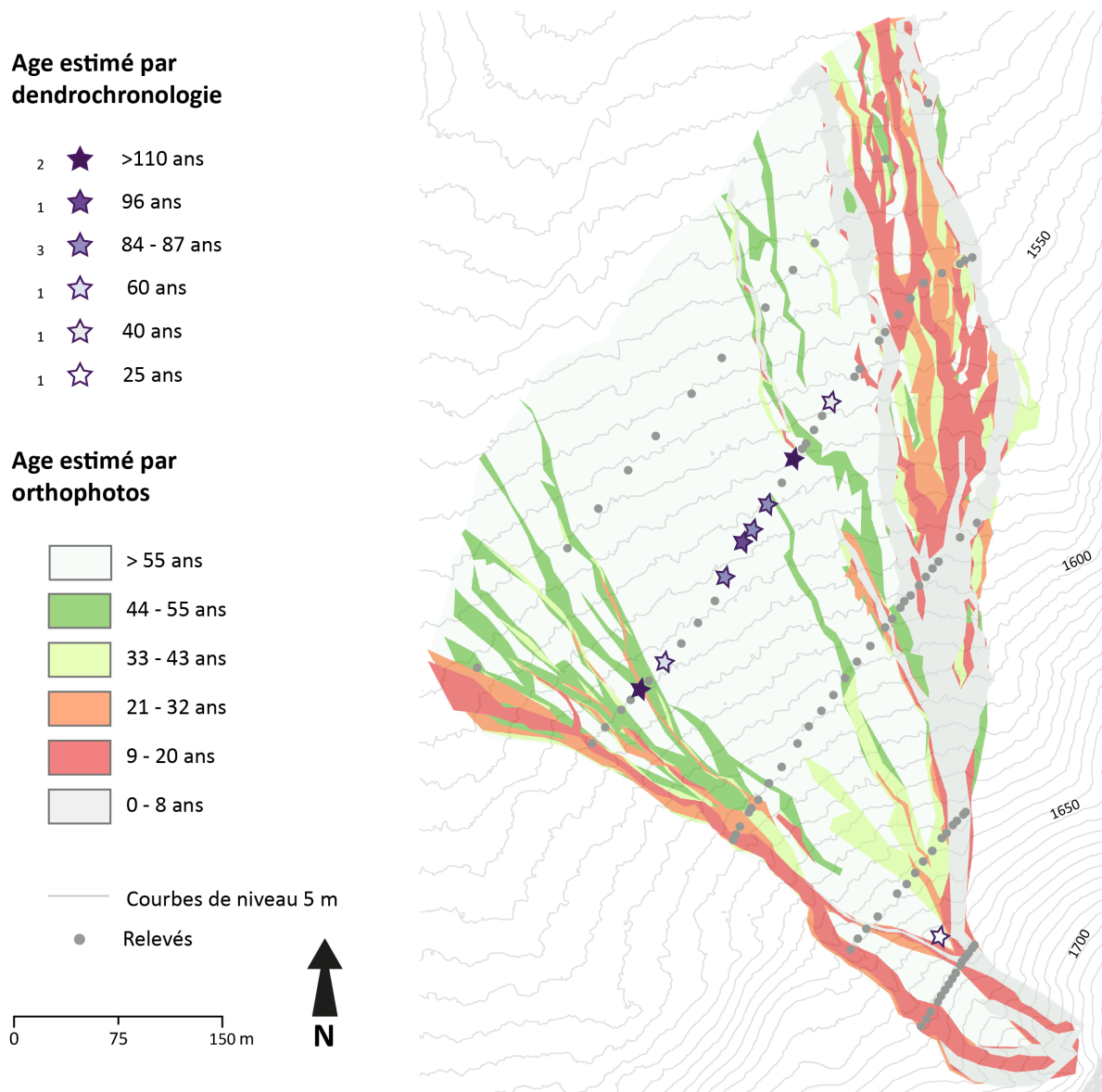


Fig 7 : Localisation des âges estimés par dendrochronologie et photos aériennes historiques (Swisstopo).

Les relevés des groupes 7 et 5 des milieux d'éboulis et d'alluvions ont moins de 10 ans. Le groupe 6, correspondant à *Epilobion fleischeri* le plus développé, compte quelques relevés plus stables de plus de 9 ans mais reste également très jeune. Les relevés du *Caricion firmae* ont entre 10 et 21 ans alors que le *Seslerion* est plus ancien, avec des âges minimaux entre 22 et 33 ans. Les relevés actuellement occupés par le *Polygono-*

*Trisetion* et la Forêt de conifères d'altitude sont globalement déjà recouverts de végétation en 1957. Les âges minimaux peuvent cependant descendre jusqu'à 34 ans pour le *Polygono-Trisetion* et 44 ans pour la Forêt de conifères d'altitude

L'arbre carotté le plus ancien est situé à proximité du relevé B17 de la Forêt de conifère d'altitude. L'échantillon est trop court pour atteindre le centre et ne permet que de supposer un âge supérieur à 110 ans. Les quatre arbres du même milieu ont entre 84 et 96 ans, excepté l'individu localisé vers B12 en bordure de forêt, nettement plus jeune (40 ans). L'arbre le plus proche du relevé B22, appartenant au *Polygono-Trisetion* mais entouré de forêt, a également 84 ans. En bordure droite du cône, la dendrochronologie indique des âges importants qui peuvent ne pas correspondre à ceux des sols. Effectivement, l'arbre du *Seslerion* en B26 a 60 ans alors que celui du *Caricion firmae* en B28, 110 ans. La carotte prélevée vers B27 présente une malformation des cernes qui ne permet pas de donner un âge. Depuis cette perturbation, 13 cernes de croissances se sont développés correctement, indiquant éventuellement une perturbation vers 2000, éventuellement lié à Lothar en 1999. L'échantillon de l'amont du cône indique un âge de 25 ans (Fig 7).

En triant les relevés selon l'axe factoriel principal (ACP) et leur âge estimé, une certaine cohérence est visible (Fig 8). Les groupes suivent donc le développement des espèces et du sol, ainsi que le temps.

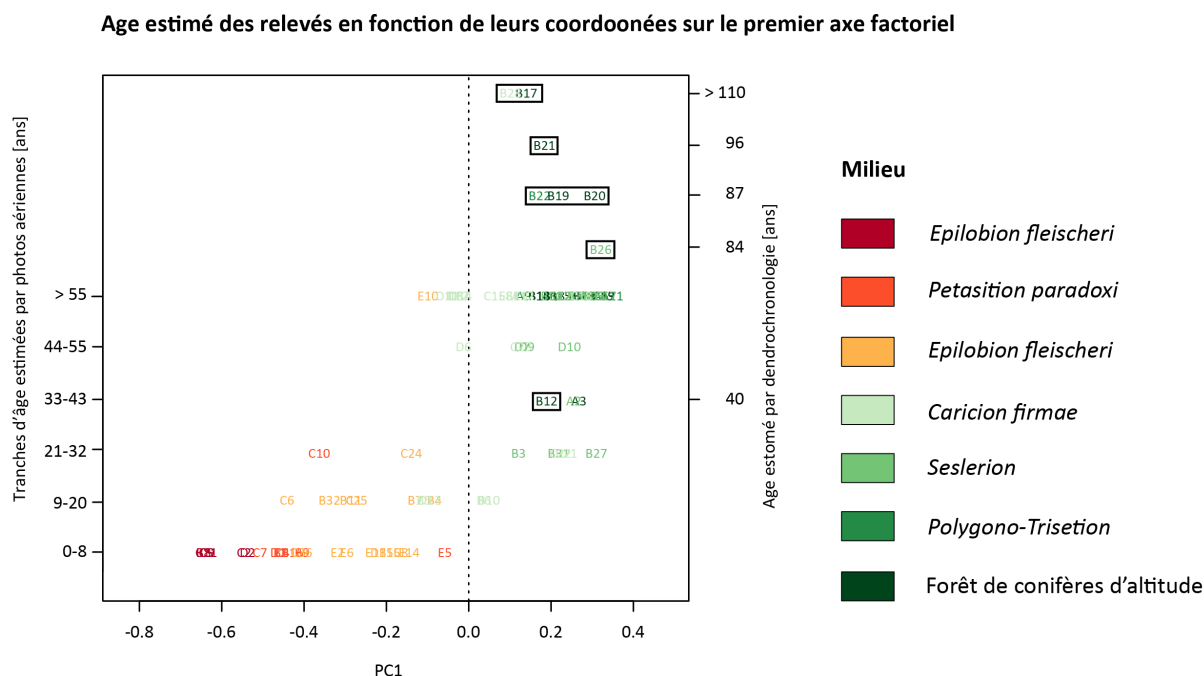


Fig 8 : Age estimé des relevés en fonction de leurs coordonnées sur le premier axe factoriel et appartenance au milieu.

## 5. Discussion

### 5.1. Dynamique amont-aval

La forme triangulaire des cônes induit une augmentation de la largeur d'amont en aval. Effectivement la longueur des sections varie fortement entre le premier et le dernier relevé, passant de 70 m en E à 520 m en A. L'espace disponible entre les chenaux, supposés de taille relativement constante, est par conséquent plus grand dans la partie inférieure (Fig 7). La probabilité pour la surface d'être perturbée par un événement est ainsi fortement réduite. La végétation peut dès lors invertir plus aisément une surface peu perturbée, comme dans les sections en aval. En amont, les chenaux disposent de moins d'espace et les débordements peuvent rapidement affecter la largeur totale du cône. L'écoulement se concentre essentiellement en bordure droite du cône des *Larzettes* depuis plus de 55 ans (photographie aérienne de 1957), ce qui favorise la rapide colonisation par l'*Epilobion fleischeri*.

L'augmentation de la largeur et de la surface disponible permet l'établissement de différents milieux par sections, essentiellement dans la partie inférieure du cône. La variation de la richesse spécifique par section (Fig 5) peut alors s'expliquer par le nombre de milieux distincts rencontrés (Fig 4). Les six milieux définis durant l'étude se concentrent le long de la section B, la plus riche avec ses 103 espèces. La section C recense encore un relevé de la Forêt de conifères d'altitude mais aucun du *Polygono-Trisetion.*, cinq milieux se répartissent ainsi ses 69 espèces. La section D, dont la richesse spécifique atteint 54 espèces, ne compte que les quatre unités végétales. A l'amont, seuls trois milieux recensent les 47 espèces rencontrées le long de la section E.

Le nombre de relevés joue probablement un léger rôle dans la richesse spécifique par section et peut favoriser la B (32 relevés) au détriment de la D ou la E (15 relevés chacune). Mais le facteur déterminant est certainement l'espace disponible aux abords du chenal actif. Plus la largeur de la section est importante, plus elle fournit de niveaux d'activité. Effectivement, la surface peut être affectée par divers événements épisodiques qui contribuent à l'alimentation sédimentaires (Harvey, 2013 ; Stoffel et al., 2013) ou qui remanient les dépôts existants et les chenaux, voire le cône (Stoffel et Wilford, 2012). La végétation dispose alors d'une mosaïque d'habitats, ce qui augmente la diversité.

A différentes échelles spatiales, les distinctions amont-aval sont également observables. Les courbes de richesse cumulée mettent en évidence la diversité maximale des sections A et B pour chaque nombre de relevés considérés. Plus la richesse spécifique par section est élevée, plus le nombre de relevés nécessaires pour l'atteindre est important. La section A est par conséquent lacunaire et nécessiterait d'avantage de relevés. Les quatre sections B, C, D et E atteignent cependant une forme asymptotique qui traduit une surface d'inventaire suffisante (Walter, 2006a). L'augmentation du nombre de relevés avec la largeur de la section

s'avère primordiale pour une bonne cohérence des résultats et un minimum de quinze relevés semble adéquat pour une richesse spécifique cumulée d'environ 50 espèces.

L'intensité des perturbations diminue avec la pente, et donc d'amont en aval. Dans la partie sommitale du cône, l'incision du chenal actif est nette. L'élargissement du lit et le dépôt plus important permettent l'établissement de petites îles dans la partie basale. Cela permet d'expliquer l'absence totale de végétation dans le chenal incisé à la hauteur de la section E alors que *Epilobium fleischeri* parvient à s'y implanter plus bas.

Malgré une certaine stabilisation induite par la végétation (Howard et Mitchell, 1985 ; Naylor et al., 2002 ; Viles et al., 2008 ; Stoffel et Wilford, 2012 ; Welber et al., 2012), la dynamique du cône ne peut être modifiée par le vivant. L'alimentation sédimentaire dépend d'événements épisodiques (Stoffel et al., 2013) contrôlés par les caractéristiques du bassin versant (Harvey, 2013). Le rôle de la végétation dans les processus physiques semble ainsi très réduit sur le cône des *Larzettes*.

## 5.2. Impacts des perturbations

Il y a une réelle concordance entre les milieux et l'âge de la stabilisation des surfaces (Fig 8), comme déjà constaté par Dickerson et al. (2012). Le tri des relevés sur l'axe factoriel principal (PC1) traduit cette dimension temporelle, qui correspond dans ce cas également au développement de la végétation et du sol (Fig 2). Le deuxième axe factoriel est négligé suite à sa redondance avec le premier (effet Guttman) (Flament et Milland, 2005). Le troisième axe factoriel (PC3) traduit l'activité du cône et donc les perturbations. Généralement, l'âge augmente avec une diminution de l'activité et l'activité induit une diminution de l'âge. Il est cependant possible de distinguer différents niveaux d'activité sur des surfaces jeunes. Les surfaces vieilles, sans être actives, peuvent connaître diverses intensités de perturbations. L'âge, malgré sa bonne correspondance aux milieux, n'est pas le seul indicateur de l'organisation des espèces. L'intégration de l'activité est ainsi nécessaire pour une vision plus intégrée des composantes de la surface terrestre.

Les relevés du premier *Epilobium fleischeri* sont jeunes et fréquemment affectés. Le *Petasition paradoxi* et l'*Epilobium fleischeri* le plus développé sont également très récents mais sont peu perturbés. Les *Caricion firmae*, *Seslerion* et *Polygono-Trisetion* occupent des terrains plus anciennement stabilisés. Le niveau d'activité y est alors plus important mais il peut s'agir de perturbations liées à la pâture par les vaches, essentiellement pour le *Polygono-Trisetion* de la partie inférieure du cône. Les relevés de la Forêt de conifère d'altitude sont à la fois anciens et stables. Ces caractérisations restent relatives, particulièrement pour les niveaux d'activités des milieux intermédiaires, éloignés des chenaux principaux.

Les perturbations sont très diversifiées en fonction de leur fréquence et de leur intensité, tous deux corrélés négativement (White, 1979 ; Cordonnier, 2004) à l'échelle du cône. Les événements fréquents sont ainsi moins destructeurs et leurs impacts moins importants que les grands dérangements rares. Les relevés des milieux intermédiaires, qui occupent des surfaces relativement anciennes et actives peuvent encore être affectés par un important événement passé. Les relevés du *Petasition paradoxi* et l'*Epilobion fleischeri* le plus développé, plus jeunes mais moins actifs, sont souvent dérangés mais par de petites perturbations. L'activité attribuée au troisième axe factoriel (PC3) peut dès lors également traduire l'intensité des perturbations.

La stabilité est certainement maximale dans la partie centrale et inférieure du cône des *Larzettes*, déjà recouverte par les arbres en 1957. La richesse spécifique par relevé augmente également en direction du centre du cône, c'est pourquoi l'hypothèse des perturbations intermédiaires (Connell, 1978) n'est pas soutenue par ce travail. Effectivement, les micro-échelles spatiale et temporelle ( $1-10^6 \text{ m}^2$  et 1-500 ans) (Delcourt et Delcourt, 1988) ne permettent pas réellement d'observer une maximisation de la diversité dans les relevés intermédiaires. La richesse spécifique et l'indice de Shannon indiquent toutefois une diversité supérieure dans le *Polygono-Trisetion* plus ouvert que la Forêt de conifères d'altitude. L'abandon des pâturages par les chèvres et les moutons engendre par exemple une augmentation des zones de forêts et de buissons et mène à une diminution de la biodiversité (Cherix et Vittoz, 2009). L'hypothèse des perturbations intermédiaires n'est pas remise en cause pour des terrains globalement plus anciens où les espèces compétitrices peuvent péjorer la diversité (Cordonnier, 2004 ; Baroni et al., 2013).

Le cône des *Larzettes* est relativement jeune mais déjà bien végétalisé, ce qui implique une colonisation rapide par l'*Epilobion fleischeri*. Apparues sept ans après la fonte du glacier du Morteratsch (1900-2100 m-s-m) aux Grisons (Suisse), *Epilobium fleischeri* et *Saxifraga aizoides* sont également les premières espèces (Burga et al., 2010). L'âge permet ensuite une transition vers les espèces boisées (Dickerson et al., 2012). Le *Larix decidua* apparaît déjà après une dizaine d'années sur le cône des *Larzettes*. Au Morteratsch, il s'agit également des premiers arbres, dont les plus rapides ne nécessitent que cinq à dix ans (Burga et al., 2010).

Le temps est un facteur déterminant en écologie (Clignez, 2004) mais pas suffisant pour une explication complète (Burga et al., 2010). Il permet notamment un développement du sol, et une diminution de la granulométrie (Dickerson et al., 2012). L'échelle temporelle restreinte des méthodes de datation et du terrain ne permet pas d'observer les tendances, comme les travaux de Bollschweiler et Stoffel (2010). En effet, les forêts du vallon sont relativement jeunes (Vittoz et Gmür, 2009) et la limitation de carottage à dix *Larix decidua* ne permet pas de couvrir tout l'espace déjà végétalisé en 1957.

### 5.3. Caractéristiques environnementales déterminantes

Différentes variables environnementales peuvent être considérées comme homogènes sur un relativement petit terrain comme le cône des *Larzettes*. Les variables déterminantes, telles que les conditions climatiques (Lacoste et Salanon, 1969 ; Jones, 1980 ; Landolt, 1986 ; Garcia-Aguire et al., 2007), l'exposition (Pfeffer et al., 2003 ; Garcia-Aguire et al., 2007 ; Yetemen et al., 2010), la pente (Pfeffer et al., 2003), la limite de la forêt (Pfeffer et al., 2003 ; Baroni et al., 2013), la limite de la neige (Baroni et al., 2013), l'utilisation des terres (Pfeffer et al., 2003), la roche-mère (Lacoste et Salanon, 1969) sont probablement atténuées, voire effacées, par des caractéristiques plus locales.

Le premier *Epilobion fleischeri*, soit le moins développé, est essentiellement minéral avec maximum 2% d'herbes pour une richesse de trois espèces en six relevés. Le sol est peu profond et les indices de Landolt l'estiment humide, basique, ensoleillé et peu humique. Sa texture est sableuse au vu de l'humidité résiduelle très faible (Baize, 2000). La perte au feu est également minimale, témoignant une très faible teneur en matière organique (Lacoste et Salanon, 1969 ; Baize, 2000). L'exposition est principalement N-NNW avec tous les relevés concentrés sur la droite du cône. Avec des relevés essentiellement localisés dans le chenal incisé, l'accumulation de flux est très importante, tout comme l'indice topographique. Le *Petasion paradoxum* compte dix-neuf espèces appréciant également la lumière avec un sol humide et basique. Le pourcentage de rochers et cailloux diminue au profit des herbes. L'humidité résiduelle et la perte au feu sont très faibles, contrairement à la granulométrie, dont la médiane est maximale, et la profondeur du sol qui prend en compte la matrice fine des chenaux abandonnés. L'*Epilobion fleischeri* le plus développé recense 56 espèces aux préférences moyennes selon les indices de Landolt. La part minérale est d'avantage colonisée par la végétation, les mousses et lichens. Le sol nu superficiel est quasiment nul et sa profondeur assez faible. La perte au feu médiane dépasse de peu 1% mais reste faible. Le recouvrement végétal du *Caricion firmiae* augmente avec l'apparition d'arbustes. La valeur médiane de l'humidité résiduelle est supérieure 1% et celle de la perte au feu à 10%. L'accumulation de flux, l'indice topographique et la granulométrie diminuent alors que la profondeur du sol augmente. Le *Seslerion* compte 74 espèces sans réelles préférences selon les indices de Landolt. Alors que les cailloux sont parfois totalement absents, la végétation couvre au moins 50% dans chaque relevé et la litière 2%. La profondeur du sol augmente, ainsi que l'humidité résiduelle et la perte au feu, contrairement à la granulométrie qui diminue encore. Les 73 espèces du *Polygono-Trisetion* occupent minimum 87.9% d'herbes par inventaire. Le sol est profond et la granulométrie relativement fine. De plus, l'humidité résiduelle médiane supérieure à 4% indique une texture argileuse (Baize, 2000). L'accumulation de flux et l'indice topographique sont par contre faibles. Dans la Forêt de conifères d'altitude, le pourcentage d'arbres et d'arbustes augmente, ainsi que celui de la litière. Le sol, plus profond, est acide et humique, ainsi qu'ombragé selon les indices de Landolt. L'humidité résiduelle indique également une texture argileuse et la perte au feu une importante part de matière organique.

L'altitude est déterminante dans la distribution de la végétation (Lacoste et Salanon, 1969 ; Pfeffer et al., 2003 ; Yetemen et al., 2010 ; Baroni et al., 2013) mais à plus vaste échelle spatiale. Effectivement, différentes variables corrélées à l'altitude sont importantes pour la végétation, comme la pression atmosphérique, la température, les précipitations, l'humidité de l'air, la luminosité, le rayonnement terrestre nocturne (Landolt, 1986) et le rayonnement solaire (Garcia-Aguire et al., 2007). Malgré son importante valeur sur l'axe principal de la RDA, son rôle est relativisé pour le cône des *Larzettes*. L'ombre portée par les parois de la Pointe d'Aufalle varie fortement entre l'amont et l'aval du terrain, ce qui détermine probablement plus la répartition végétale que les 138 m de différence entre le relevé le plus haut et le plus bas. Induite par l'altitude, la dynamique du cône, liée à sa largeur, reste le facteur primordial pour le développement végétal.

Les milieux peu végétalisés sont globalement influencés par des conditions externes alors que les milieux plus développés sont corrélés aux variables relatives au substrat (Fig 6).

## 6. Conclusion

La phyto-géomorphologie permet d'observer les multiples interactions entre les composantes biotiques et abiotiques. Aux échelles spatiales et temporelles réduites, le rôle de certaines variables environnementales peut être considéré comme constant pour tout le terrain. L'importance de diverses caractéristiques permet toutefois de mieux comprendre l'établissement des unités phytosociologiques.

La réalisation de 100 inventaires floristiques avec le coefficient d'abondance-dominance de Braun-Blanquet met en évidence sept groupes rattachés aux milieux naturels suisses par les valeurs indicatrices. Le groupement correspond, dans le cas du cône des *Larzettes*, au développement végétal et à l'âge des surfaces. L'organisation des relevés par sections transversales met en évidence la dynamique amont-aval. L'élargissement du cône de la partie sommitale à la partie basale induit effectivement un accroissement de la richesse spécifique par section. L'augmentation de la surface disponible aux abords des chenaux incisés induit une multiplication des niveaux d'activité qui favorise la diversité végétale. Cet effet, traduit par l'altitude dans les analyses statistiques, est visible aux différentes échelles spatiales (Fig 5).

Par sa formation relativement récente, le cône des *Larzettes* ne permet pas de confirmer l'hypothèse des perturbations intermédiaires. Effectivement, la richesse spécifique des relevés augmente avec l'âge sans indiquer une diminution de la diversité en milieux stables. La Forêt de conifères d'altitude compte tout de même des relevés moins riches que le *Polygono-Trisetion*, plus ouvert. Sur un terrain qui comporterait des secteurs plus anciens avec des espèces compétitrices, il n'est de loin pas exclu de pouvoir confirmer l'hypothèse des perturbations intermédiaires, c'est pourquoi elle n'est pas réfutée.



Les méthodes de datation, par comparaison de photographies aériennes et dendrochronologie, fournissent uniquement des estimations de tranches d'âges, ce qui ne permet pas de les confronter aux différentes données, essentiellement météorologiques. Afin de connaître l'impact des perturbations en fonction de leur intensité, il est effectivement nécessaire d'avoir des données plus précises et comparables dans le temps, mais inaccessible sans un monitoring important sur plusieurs décennies.

La distribution de la végétation est corrélée aux reliefs et à l'âge mais les milieux ne peuvent servir d'indicateurs fiables pour les unités géomorphologiques. Il est effectivement possible de prévoir les caractéristiques biotiques avec les abiotiques et inversement, mais en aucun cas de les prédire. La végétation et la dynamique évoluent conjointement sur le cône des *Larzettes*, c'est pourquoi les réponses ne sont pas réellement perceptibles et prévisibles. D'avantage de travaux sont nécessaires afin de mieux comprendre les multiples interactions à l'interface entre les discipline de la surface terrestre.



## III Partie conclusive

# 1. Conclusion

La phyto-géomorphologie se focalise sur les multiples interactions entre les processus physiques et la végétation mais leur complexité ne permet pas de les isoler. Un cône de déjection offre une importante diversité de stades d'activité et fournit ainsi un terrain adéquat. Le statut de réserve du Vallon de Nant permet de focaliser sur les caractères essentiellement naturels, malgré la pâture qui affecte la partie inférieure du cône des *Larzettes*. Différentes composantes environnementales sont considérées comme invariables sur la surface d'étude, relativement restreinte mais les données correspondent globalement aux milieux. Les méthodes s'avèrent donc concluantes.

La répartition de la végétation suit à la fois celle de l'âge du terrain et celle de l'activité. Ces deux composantes, chacune insuffisante sans considérer l'autre, sont corrélées à la largeur du cône. Effectivement, l'espace disponible entre les chenaux incisés joue un rôle majeur pour le développement des espèces et du sol. Son augmentation d'amont en aval se traduit par une richesse spécifique supérieure dans la partie basale pour chaque échelle spatiale. Les analyses statistiques ne traduisent pas forcément la réalité et il est important de prendre en considération les éléments non mesurés qui peuvent influencer les résultats. Malgré son importance selon la RDA, l'altitude varie peu à l'échelle du cône des *Larzettes* mais elle traduit la dynamique amont-aval et l'augmentation de la largeur. La végétation ne dépend pas forcément des processus physiques, elle peut évoluer conjointement aux caractéristiques géomorphologiques, sans véritables liens de causalité.

D'avantages de recherches doivent être exécutées en phyto-géomorphologie et plus globalement en bio-géomorphologie afin d'améliorer la compréhension à l'interface des disciplines traditionnelles. Quelques pistes sont proposées dans les perspectives mais la phyto-géomorphologie, et plus largement la bio-géomorphologie, n'a pas de limite.

## 2. Perspectives

### 2.1. Terrains d'étude potentiels

Les relevés utilisés dans ce travail sont géo-référencés, ce qui permet de poursuivre les recherches. Les milieux floristiques sont effectivement définis à l'été 2012 et l'étude de leur évolution serait pertinente afin d'observer les conséquences des perturbations. Des relevés peuvent également être ajoutés afin d'agrandir la surface analysée. Les méthodes, mesures et calculs sont décrits afin de permettre une bonne reproductibilité, trop souvent impossible (Naylor et al., 2002).

Les réserves naturelles sont des terrains d'études bien adaptés pour observer les multiples interactions entre le vivant et le non-vivant. En effet, les affectations anthropiques y sont négligeables, ce qui favorise une meilleure compréhension des processus naturels actifs. La liste d'interdits peut toutefois péjorer les mesures et les résultats, notamment des caractéristiques pédologiques.

Les cônes offrent une grande diversité d'habitats grâce aux multiples niveaux d'activité (Stoffel et Wilford, 2012). Les recherches en phyto-géomorphologie se prêtent dès lors très bien à ces formes qui ne cessent d'évoluer. Les caractéristiques diffèrent cependant selon les cônes, ce qui peut rendre la comparaison difficile. Diverses recherches en phyto-géomorphologie concernent le rôle de la végétation dans les processus d'érosion et de dépôt en zones arides et semi-arides. Les surfaces pro-glaciaires et les caractéristiques de leur substrat sont encore peu étudiées (Burga et al., 2010) et nécessitent d'avantage de prospections.

## 2.2. Données à analyser en phyto-géomorphologie

Les travaux interdisciplinaires nécessitent différents spécialistes afin d'approfondir les recherches au maximum. La collaboration est dès lors un atout majeur.

Le sol joue un grand rôle dans la distribution de la végétation, c'est pourquoi les mesures pédologiques sont importantes (Clot et Delarze, 2009). Le statut de réserve empêche tout endommagement mais dans d'autres travaux, la profondeur du sol devrait se faire par creusement et les échantillons effectués en respectant les horizons (Baize, 2000).

Les impacts réels des variations climatiques restent encore lacunaires. Des mesures climatiques ponctuelles, notamment des températures, précipitation et vents, apporteraient d'importantes informations pour autant que la zone d'étude soit assez diversifiée. De telles informations devraient toutefois être homogènes sur le cône des Larzettes. Dans les travaux à venir, le rayonnement solaire devrait être mesuré et introduit dans les analyses statistiques des recherches futures au vu de son importance (Garcia-Aguire et al., 2007). Avec des méthodes de datation suffisamment précises, les événements hydro-géomorphologiques pourraient de plus être confrontés aux précipitations afin de quantifier leurs impacts. La fonte serait alors estimée et ajoutée.

Les activités humaines modifient de nombreuses variables, dont certaines affectent le vivant et la végétation. Il est dès lors difficile, voire impossible, de connaître l'influence anthropique réelle. La comparaison entre des sites naturels et d'autres pleinement affectés par l'Homme pourrait apporter des réponses. Seules des études en laboratoire permettent de créer des situations parfaitement similaires afin d'isoler les différentes composantes du système superficiel de la Terre.

### 2.3. Méthodes de datation

Différentes méthodes, dépendant notamment du terrain et des ressources à disposition, permettent la datation des événements. L'un des éléments clés est effectivement l'acquisition des données chronologiques (Mercier, 2008). La reconstitution des événements hydro-géomorphologiques passés est cruciale pour une meilleure compréhension des processus dynamiques torrentiels actuels à double échelle spatiale et temporelle (Stoffel et Wilford, 2012). La datation fait ainsi partie des facteurs à ne pas négliger dans les études en biogéomorphologie. Des données sur un grand laps de temps permettent d'observer des tendances (Bollschweiler et Stoffel, 2010)

Les photographies aériennes, même avec un grand intervalle, fournissent une information importante. Dans le but de faire un travail plus précis prenant compte l'évolution de la végétation, il serait optimal d'obtenir un cliché du terrain d'étude par année. La dendrochronologie vise à dater au-delà des photographies mais l'âge des arbres ne correspond pas forcément à celle du sol puisqu'ils peuvent résister à diverses perturbations.

Les écosystèmes peuvent garder certaines perturbations géomorphologiques en mémoire et fournir un enregistrement de leur fréquence et magnitude (Rice et al., 2012). Diverses études paléo-écologiques permettent alors la datation et la reconstruction des paléo-environnements (Naylor et al., 2002).

La dendro-géomorphologie permet de reconstruire les événements historiques (Rice et al., 2012 ; Stoffel et Wilford, 2012) en tenant compte des observations complémentaires du terrain (Stoffel et al., 2005). Les arbres fournissent un moyen incroyablement précieux pour reconstituer les activités hydro-géomorphologiques et écologiques (Stoffel et Wilford, 2012). La dendro-géomorphologie se concentre principalement sur les 150 dernières années, qui sont les plus importantes (Stoffel et Wilford, 2012). Une étude plus approfondie des cernes pourrait apporter des informations utiles sur les conditions puisque la croissance diminue, voire est nulle, en cas de difficultés (Stoffel et Wilford, 2012). L'autorisation à carotter uniquement dix *Larix decidua* limite considérablement les investigations possibles en dendro-géomorphologie mais il s'agit d'un outil remarquable pour d'autres projets.

La lichenométrie prend en compte la taille des lichens sur les rochers en se basant sur un taux de croissance connu (Roussel et al., 2009). Cette méthode de datation est particulièrement utile en région de hautes altitudes ou latitude où le matériel organique et la végétation ligneuse se font rares pour l'usage du radiocarbone ou de la dendrochronologie (Cossart et al., 2006). Le *Rhizocarpon geographicum* est fréquemment utilisé pour la datation (Haeberli et al., 1979) mais occupe essentiellement les parois siliceuses (Delarze et Gonseth, 2008), absentes du Vallon de Nant (Badoux, 1971).

L'*herbchronology*, inspirée de la dendrochronologie, vise à compter les cernes de croissance du deuxième xylème des racines des plantes (Erschbamer et Retter, 2004). Cette méthode a été sous-utilisée pour

l'acquisition d'informations d'ordre écologique sur les communautés végétales mais elle est fortement limitée dans le temps par l'individu analysé (Dietz et Ullman, 1997).

Des méthodes de datation relativement nouvelles permettent de dater la surface terrestre, ce qui induit l'âge de la dernière perturbation. La datation par luminescence stimulée optiquement s'est fortement développée durant les vingt dernières années (Mercier, 2008). La thermoluminescence (TL) exploite le signal émis par les grains de quartz et de feldspaths et rendus observables après calcination des minéraux à environ 500°C (Mercier, 2008). Les signaux de luminescence stimulés optiquement (OSL pour *Optically Simulated Luminescence*) résultent d'une simulation induite directement par la lumière, c'est pourquoi les échantillons doivent être maintenus dans le noir (Mercier, 2008). L'OSL portable permet d'identifier les échantillons les plus prometteurs directement sur le terrain (Sanderson et Murphy, 2010) mais nécessite une certaine infrastructure. Les dépôts récents du Quaternaire se prêtent particulièrement bien à cette méthode (Mercier, 2008) mais rien ne confirme que les âges OSL correspondent à l'âge réel des dépôts (Bozsó et al., 2010).

La méthode *Rock Varnish Microlamination* (VML) vise à dater l'exposition des roches aux agents par analyse de la micro-stratigraphie visible dans les microlaminations (5-10  $\mu\text{m}$ ) de vernis de la surface rocheuse (Liu, et Broecker, 2008). Cette méthode, allant jusqu'au Pléistocène tardif (126 000 ans), surtout adaptée aux importants dépôts des régions arides et semi-arides (Liu, et Broecker, 2008 ; Diskerson et al., 2011).

## 2.4. Différentes échelles d'analyse

Sur un cône la variation d'échelle spatiale révèle la dynamique amont-aval. Sur une unité géomorphologique différente, cette analyse reste importante car l'objectif est d'identifier l'échelle à partir de laquelle la richesse est maximisée.

Travailler à l'échelle du mètre carré permet des inventaires relativement complets et précis. Il ne faut cependant pas négliger les interactions des composantes avec le système terrestre (Rice et al., 2012). Des travaux aux échelles plus vastes sont également importants pour une meilleure compréhension des relations multiples entre le vivant et le non-vivant. Inversement, une taille plus réduite permettrait de mieux tenir compte de la granulométrie dans les premiers stades de colonisation.

Une échelle spatiale sur plusieurs années devrait permettre des comparaisons. La réponse de la végétation au changement climatique est encore incertaine malgré diverses prospections (Saugier, 1996 ; IPCC, 2007 ; Vittoz et al., 2009).





## IV Bibliographie

# 1. Littérature

- Badoux, H. (1971). Feuille 1305 *Dent de Morcles*. Atlas géologique de la Suisse 1 : 25 000, Cartes et Notice explicative 58.
- Badoux, H. (1972). *Tectonique de la nappe de Morcles entre Rhône et Lizerne*. Matériaux pour la Carte Géologique de la Suisse, Nouvelle série, 143<sup>e</sup> livraison. Berne : Staempfli + Cie.
- Baize, D. (2000). *Guide des analyses en pédologie*, 2e édition revue et augmentée. Paris : INRA.
- Baize, D. (2004). *Petit lexique de pédologie*. Paris : INRA.
- Baroni, C., Gentili, R. et Armiraglio, S. (2013). Vegetation Analysis on Composite Debris Cones. In M. Schneuwli-Bollschweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau (Eds), *Dating Torrential Processes on Fans and Cones : Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment* (pp. 187-201). Dordrecht : Springer.
- Blair, T. et McPherson, J. G (1994). Processes and Forms of Alluvial Fans. In A. J. Parsons et A. D. Abrahams (Eds), *Geomorphology of Desert Environments* (pp. 413-465). London : Chapman & Hall.
- Bollschweiler, M. et Stoffel, M. (2010). Tree rings and debris flows : Recent developments, future directions. *Progress in Physical Geography*, 34, (5), 625-645.
- Borcard, D., Gillet, F. et Legendre, P. (2011). *Numerical ecology with R*. New-York : Springer.
- Bozsó, E. T., Csillag, G., Fodor, L. I., Müller, P. M. et Nagy, A. (2010). OSL-dating the Quaternary landscape evolution in the Vértes Hills forelands (Hungary). *Quaternary Geochronology*, 5, 120-124.
- Burga, C. A., Krüsi, B., Egli, M., Wernli, M., Elsener, S., Ziefle, M., Fischer, T. et Mavris, C. (2010). Plant succession and soil development on the foreland of the Morteratsch glacier (Pontresina, Switzerland) : Straight forward or chaotic ? *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205, (9), 561-576.
- Bütler, R. et Domergue, F.-L. (1997). Valeurs indicatrices de la végétation et des sols d'une moraine granitique de l'étage subalpin. *Rev. Ecol. Alp. Grenoble*, 4, 1-12.

- Cherix, D. et Vittoz, P. (2009). Synthèse et conclusions aux Journées de la biodiversité 2008 dans le Vallon de Nant (Bex, Alpes vaudoises). *Mémoire de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles (SVSN)*, 23, 225-240.
- Clignez, M. (2004). Le point de vue de l'écologue. *Conversations paysagères. Métiers du paysage*, 13, Gembloux 45-50.
- Clot, F. et Delarze, R. (2009). Typologie des groupements végétaux forestiers du canton de Vaud : rupture nécessaire d'une tradition. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 160, (S1), s13-s17. Disponible sur : <http://www.szjfs.org/doi/pdf/10.3188/szf.2009.s0013> (consulté le 11.06.2013).
- Connel, J. H. (1978). Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs. *Science, New Series*, 199, (4335), 1302-1310.
- Cordonnier, T. (2004). *Perturbations, diversité et permanence des structures dans les écosystèmes forestiers*. Thèse de doctorat non publiée. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF), Cemagref Grenoble Unité EPM, Université Paris XI Département EPC Ecologie, Systématique et Evolution. Disponible sur : [http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/49/98/07/PDF/THESE\\_04ENGR0010.pdf](http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/49/98/07/PDF/THESE_04ENGR0010.pdf) (consulté le 11.06.2013).
- Corenblit, D., Gurnell, A. M., Steiger, J. et Tabacchi, E. (2008). Reciprocal adjustments between landforms and living organisms : Extended geomorphic evolutionary insights. *Catena*, 73, 261-273.
- Corenblit, D., Baas, A. C. W., Bornett, D., Darrozes, J., Delmotte, R. A. F., Gurnell, A. M., Julien, F., Naiman, R. J., Steiger, J. (2011). Feedbacks between geomorphology and biota controlling Earth surface processes and landforms : a review of foundation concepts and current understandings. *Earth-Science Reviews*, 106, 307-331.
- Cossart, E. Fort, M., Jomelli, V. et Grancher, D. (2006). Les variations glaciaires en Haute-Drance (Briançonnais, Haute-Aples) depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle : mise au point d'après les documents d'archives et la lichenométrie. *Quaternaire*, 17, (1), 75-92.
- Cowles, H. C. (1899). The Ecological Relations of the Vegetation on the Sand Dunes of Lake Michigan (Concluded). *Botanical gazette*, 27, (5), 361.391.
- Delarze, R. et Gonseth, Y. (2008). *Le guide des milieux naturels de Suisse : Ecologie – Menaces – Espèces caractéristiques*. Bussigny : Rossolis.

- Delcourt, H. R. et Delcourt, P. A. (1988). Quaternary landscape ecology : Relevant scales in space and time. *Landscape Ecology*, 2, (1), 23-44.
- Descroix , L., Viramontes, D et Vauclin, M. (2011). Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena*, 43, 115-135.
- Desrochers, A. (1996). *Détermination de l'âge de l'Épinette noire (Picea mariana) en sous-étage de Peupliers faux-trembles (Populus tremuloides) dans la Forêt boréale, Québec*. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ressources renouvelables. Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).
- Dickerson, R. P., Forman, A. & Liu, T. (2012). Co-development of alluvial fan surfaces and arid botanical communities, Stonewall Flat, Nevada, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*. ARTICLE PUBLISHED ONLINE 30 OCT 2012. Disponible sur : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3336/full> (consulté le 20.05.2013).
- Dietz, H. et Ullmann, I. (1997). Age Determination of Dicotyledonous Herbaceous Perennials by Means of Annual Rings : Exception or Rule ? *Annals of Botany*, 80, 377-379.
- Dutoit, A. (1983). *La végétation de l'étage subalpin du Vallon de Nant*. Lausanne : Section protection de la nature et des sites et Conservation de la faune du canton de Vaud
- Erschbamer, B. et Retter, V. (2004). How long can glacier foreland species live ? *Flora*, 199, 500-504.
- Flament, C. et Milland, L. (2005). Un effet Guttman en ACP. *Mathematics and Social Sciences*, 171, (43<sup>e</sup> année), 25-49.
- Fonstad, M. A. (2006). Cellular automata as analysis and synthesis engines at the geomorphology-ecology interface. *Geomorphology*, 77, 217-234.
- Garcia-Aguire, M. C., Ortiz, M. A., Zamorano, J. J. et Reyes, Y. (2007). Vegetation and landform relationships at Ajusco volcano Mexico, using a geographic information system (GIS). *Forest Ecology and management*, 239, 1-12.
- Garitte, G., Lahousse, P., Ténard, L. et Salvador, P.-G. (2007). Evolution contemporaine de l'activité torrentielle sur les cônes de déjection de la basse vallée de la Clarée (Briançonnais, Alpes françaises du Sud). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 293-308.

- Gascuel-Oudou, C., Merot, P., Crave, A., Gineste, P., Taha, A. et Zhang, Z. (1998). Les zones contributives de fonds de vallée : localisation, structure et fonctionnement hydrodynamique. In C. Cheverry (Ed), *Agriculture intensive et qualité des eaux - Science update* (pp.129-142). Quae, INRA
- Haeberli, W., King, L. et Flotron, A. (1979). Surface movement and liche-cover studied at the active rock glacier near the Grubenglatscher, Wallis, Swiss alps. *Arctic and Alpine Research*, 11, (4), 421-441.
- Harvey, A. M. (2012). The coupling status of alluvial fans and debris cones : a review and synthesis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 64-76.
- Harvey, A. M. (2013). Processes of Sediment Supply to Alluvial Fans and Debris Cones. In M. Schneuwli-Bollschweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau (Eds), *Dating Torrential Processes on Fans and Cones : Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment* (pp. 15-32). Dordrecht : Springer.
- Hession, C. W., Curran, J. C. et Resler, L. M. (2010). Preface : Geomorphology and vegetation : Interactions, dependencies, and feedback loops. *Geomorphology*, 116, 203-205.
- Howard, J. A. et Mitchell, C.W. (1985). *Phytogeomorphology*. New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore : John Wiley & Sons.
- Hughes, A. R. (2010). Disturbance and Diversity : an ecological chicken and egg problem. *Nature Education Knowledge*, 3, (10), 48. [Page Web]. Disponible sur : <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/disturbance-and-diversity-an-ecological-chicken-and-13256228> (consulté le 08.06.2013).
- Huston, M. (1979). A General Hypothesis of Species Diversity. *The American Naturalist*, 113, (1), 81-101.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). IPCC Fourth Assessment Report : Climate Change 2007. Climate Change 2007 : working Group II : Impacts, Adaptation and Vulnerability. 4.4.7 Mountains [Page Web]. Disponible sur : [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg2/en/ch4s4-4-7.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch4s4-4-7.html) (consulté le 11.06.2013).
- Johnson, E. A. et Miyanishi, K. (2010). Disturbance and Succession. In E. A. Johnson et K. Miyanishi (Eds), *Plant Disturbance Ecology : The process and the response* (pp. 1-14). Burlington – San Diego – London : Elsevier.

- Jones, R. L. (1980). *Biogeography : Structure, Process, Pattern and Change within the Biosphere*. Amersham : Hulton Educational Publications.
- Kirkby, M. J. (1975). Hydrograph modelling strategies. In R. Peel, M. Chisholm et P. Haggett (Eds), *Process in Physical and Human Geography* (pp. 69-90.). London : Heinemann.
- Lacoste, A. et Salanon, R. (1969). *Eléments de biogéographie et d'écologie*. Paris : Université Nathan Information Formation, Femand Nathan.
- Landolt, E. (1986). *Notre flore alpine*. 3<sup>e</sup> édition d'après la 5<sup>e</sup> édition allemande, entièrement remaniée. Adaptation française par D. Aeschmann. Brugg : Club Alpin Suisse.
- Landolt, E., Bäumler, B., Erhardt, A., Hegg, O., Klötzli, F., Lämmler, W., Nobis, M., Rudmann, K., Schweingruber, F. H., Theurillat, J.-P., Urmi, E., Vust, M. et Wohlgenut, T. (2010). *Flora indicativa – Ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora des Schweiz und der Alpen*. Bern : Verlag Haupt.
- Legendre, P. et Gallagher, E. D. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129, 271-280.
- Liu, T. et Broecker, W. S. (2008). Rock varnish microlamination dating of late Quaternary geomorphic features in the drylands of western USA. *Geomorphology*, 93, 501-523.
- Mercier, N. (2008). Datation de sédiments Quaternaires par luminescence stimulée optiquement : un état de la question. *Quaternaire*, 19, (3), 195-204.
- Millard, T. H., Hogan, D. L., Wilford, D. J. et Roberts, B. (2010). A method to asses fluvial channel networks, with a preliminary application to fans in coastal British Columbia. *Geomorphology*, 115, 286-293.
- Moreno, M. T., Audesse, P., Giroux, M., Frenette, N. et Cescas, M. (2001). Comparaison entre la détermination de la matière organique des sols par la méthode de Walkley-Black et la méthode de perte au feu. *Agrosol : compte rendu de recherche en agroenvironnement*. IRDA Institut de recherche et de développement en agroenvironnement Inc. 12, (1), 49-58.
- Murray, B. et Fonstad, M. A. (2007). Preface : Complexity (and simplicity) in landscapes. *Geomorphology*, 91, 173-177.
- Naylor, L. A., Viles, H. A. et Carter, N. E. A. (2002). Biogeomorphology revisited : looking towards the future. *Geomorphology*, 47, 3-14.

- Osterkamp, W. R., Hupp, C. R. et Stoffel, M. (2012). The interactions between vegetation and erosion : new directions for research at the interface of ecology and geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 23-36.
- Parc National Suisse (2013). Nature – Habitat – La forêt de montagne – La limite supérieure de la forêt. [Page Web] Disponible sur : <http://www.nationalpark.ch/go/fr/flore-et-faune/habitats/la-foret-de-montagne/la-limite-superieure-de-la-foret/> (consulté le 11.06.2013).
- Pfeffer, K., Pebesma, E. J. et Burrough, P. A. (2003). Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. *Landscape Ecology*, 18, 759-776.
- Pickett, S. T. A. et White, P. S. (1985). *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. : San Diego : Academic Press.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. et Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological processes*, 5, 59-79.
- Randin, C. (2002). *Etude diachronique d'une zone alluviale dans le Vallon de Nant (Préalpes vaudoises)*. Travail de diplôme, Université de Lausanne, Faculté de biologie et de médecine, Département d'écologie et d'évolution.
- Reinhardt, L., Jerolmack, D., Cardinale, B. J., Vanacker, V. et Wright, J. (2010). Dynamic interactions of life and its landscape : feedbacks at the interface of geomorphology and ecology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35. 78-101.
- Rice, S., Stoffel, M., Turowski, J. M. et Wolf, A. (2012). Disturbance regimes at the interface of geomorphology and ecology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1678-1682.
- Roulier, C. (1998). *Typologie et dynamique de la végétation des zones alluviales de Suisse*. Matériaux pour le levé géobotanique de la Suisse 72 (Geobotanica Helvetica 72). Volume I : texte, tableaux, figures. Volume II : annexes (tableau de végétation). Teufen : Krypto.
- Roussel, E., Chenet, M., Grancher, D. et Jomelli, V. (2009). Processus et rythmes de l'incision des sandar proximaux postérieure au petit âge glaciaire (sud de l'Islande). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 235-248.

- Sanderson, D. C. W. et Murphy, S. (2010). Using simple portable OSL measurements and laboratory characterisation to help understand complex and heterogeneous sediment sequences for luminescence dating. *Quaternary Geochronology*, 5, 299-305.
- Saugier, B. (1996). *Végétation et atmosphère*. Evreux : Dominos Flammarion.
- Schlup, M., Kozlik, L. et Marthaler, M. (2009). *Dent de Morcles et les Martinets : de Demècre à Pont de Nant, de la mer aux montagnes plissées, puis érodées*, Confédération suisse, sc | nat Géosciences 7 8. Planet earth Via Geo Alpina, Via Alpina, IUGS, FGSE UNIL
- Schwanghart, W. et Kuhn, N. J. (2010). TopoToolbox : A set of Matlab functions for topographic analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25, 770-781.
- Stallins, J. A. (2006). Geomorphology and ecology : Unifying themes for complex systems in biogeomorphology. *Geomorphology*, 77, 207-216.
- Stoffel, M. et Wilford, D. J. (2012). Hydrogeomorphic processes and vegetation : disturbance, process histories, dependencies and interactions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 9-22.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Monbaron, M. et Perret, S. (2005). Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Swiss Alps) – a dendrochronological approach. *Z. Geomorphol. N. F.* 49, (1), 89-106. Berlin – Stuttgart.
- Stoffel, M., Schneuwly-Bollschweiler, M. et Rudolf-Miklau, F. (2013). Dating Past Events on Fans and Cones – An Introduction. In M. Schneuwly-Bollschweiler, M. Stoffel et F. Rudolf-Miklau (Eds), *Dating Torrential Processes on Fans and Cones : Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment* (pp. 1-11). Dordrecht : Springer.
- Van Mantgem, P. J. & Stephenson, N. L. (2004) Does coring contribute to tree mortality? *Canadian Journal of forest Research*, 34, 2394-2398.
- Vanpeene-Bruhier, S., Moyne, M.-L. & Brun, J.-J. (1998). La richesse spécifique : un outil pour la prise en compte de la biodiversité dans la gestion de l'espace – Application en Haut Maurienne (Aussois, Savoie). *Ingénieurs – EAT*, 15. 47-59.
- Veyret, Y. et Vigneau, J.-P. (Dir) (2004). *Géographie physique : milieux et environnement dans le système terre*. Paris : Armand Colin.



- Viles, H. A., Naylor, L. A., Carter, N. E. A. et Chaput, D. (2008). Biogeomorphological disturbance regimes : progress in linking ecological and geomorphological systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 1419-1435.
- Viseras, C., Calvache, M. L., Soria, J. M. et Fernández, J. (2003). Differential features of alluvial fans controlled by tectonic or eustatic accommodation space. Examples from the Betic Cordillera, Spain. *Geomorphology*, 50, 181-202.
- Vittoz, P. et Gmür, P. (2009). Introduction aux Journées de la biodiversité dans le Vallon de Nant (Bex, Alpes vaudoises). *Mémoire de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles (SVSN)*, 23, 3-20.
- Vittoz, P., Randin, C., Dutoit, A., Bonnet, F. et Hegg, O. (2009). Low impact of climate change on subalpine grasslands in the Swiss Northern Alps. *Global Change Biology*, 15, 209-220.
- Walter, J.-M. N. (2006)a. *Méthodes d'étude de la végétation – Méthode du relevé floristique : introduction* (1<sup>re</sup> partie). Strasbourg : Université Louis Pasteur [Page Web]. Disponible sur : <http://equinoxe.u-strasbg.fr/sgc/equipe/pdf/releve-01.pdf> (consulté le 25.05.2013).
- Walter, J.-M. N. (2006)b. *Méthodes d'étude de la végétation – Méthode du relevé floristique : exercices* (2<sup>e</sup> partie) Strasbourg : Université Louis Pasteur [Page Web]. Disponible sur : <http://equinoxe.u-strasbg.fr/sgc/equipe/pdf/releve-02.pdf> (consulté le 25.05.2013).
- Welber, M., Bertoli, W. et Tubino, M. (2012). The response of braided planform configuration to flow variation, bed reworking and vegetation : the case of the Tagliamento River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 572-582.
- Wheaton, J. M., Gibbins, C., Wainwright, J., Larsen, L. & McElroy, B. (2011). Preface : Multiscale Feedbacks in Ecogeomorphology, *Geomorphology*, 126, 265-268.
- Whipple, K. X., Parker, G., Paola, C. et Mohrig, D. (1998). Channel Dynamics, Sediment Transport, and the Slope of Alluvial Fans : Experimental Study. *The Journal of Geology*, 106, 6, 677-694.
- White, P. (1979). Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *The botanical review*, 35, (3), 229-299.
- Wunder, J., Reineking, B., Hillgarter, F. W., Bigler, C. & Bugmann, H. (2011) Long-term effects of increment coring on Norway spruce mortality. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, 2326-2336.

Yetemen, O., Istanbuloglu, E. et Vivoni, E.R. (2010). The implications of geology, soils and vegetation on landscape morphology : Inferences from semi-arid basins with complex vegetation patterns in Central New Mexico, USA. *Geomorphology*, 116. 246-263.

## 2. Fonds de carte / MNT

Etat de Vaud – Office de l’information sur le territoire (2002). Modèle Numérique de Terrain – MNT-MO grille 1m. Secteur 1305, Système de référence CH 1903 MN03.

Swisstopo : Confédération Suisse, Office de topographie. *map.geo.admin.ch* (CH1903 / LV03) [Page Web]. Disponible sur : <http://map.geo.admin.ch/?lang=fr> (consulté le 12.06.2013).

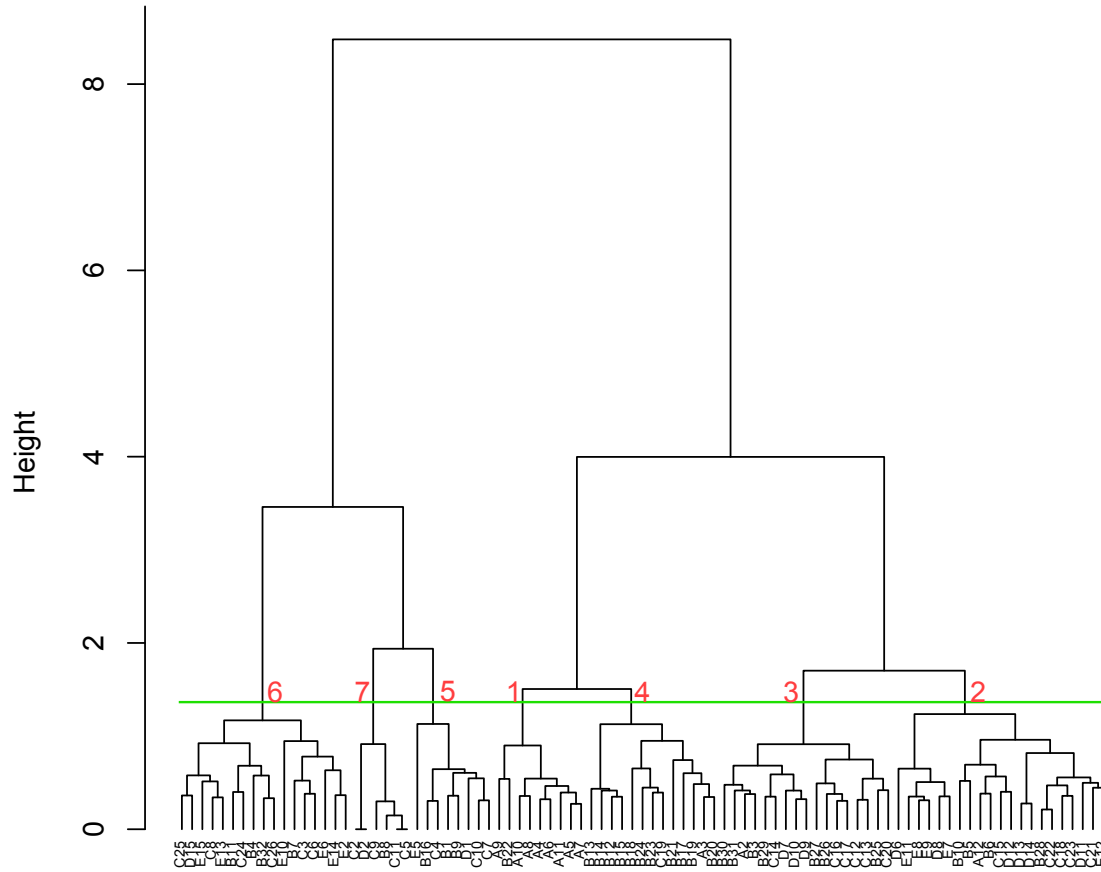
Swisstopo : Confédération Suisse, Office de topographie : Photos aériennes 1957, 1969, 1980, 1992, Noir-Blanc.

Swisstopo. Confédération Suisse, Office de topographie : Orthophotos 2004, Couleurs.

## V Annexes

# Dendrogramme

## Cluster Dendrogram



rel.distance  
hclust (\*, "ward")











## Indices de diversité

| Relevé | Groupe | Richesse spécifique | Shannon diversity | Shannon entropy | Simpson Diversity | Simpson Eveness |
|--------|--------|---------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| B24    | 4      | 35                  | 34.092            | 3.529           | 33.344            | 0.953           |
| A3     | 4      | 33                  | 29.624            | 3.389           | 26.683            | 0.809           |
| B19    | 4      | 30                  | 27.754            | 3.323           | 25.498            | 0.850           |
| B20    | 4      | 30                  | 27.479            | 3.313           | 24.732            | 0.824           |
| B17    | 4      | 29                  | 26.560            | 3.279           | 23.674            | 0.816           |
| C19    | 4      | 29                  | 28.094            | 3.336           | 27.328            | 0.942           |
| B12    | 4      | 28                  | 25.221            | 3.228           | 22.447            | 0.802           |
| B13    | 4      | 26                  | 24.750            | 3.209           | 23.439            | 0.902           |
| B15    | 4      | 26                  | 24.515            | 3.199           | 22.881            | 0.880           |
| B23    | 4      | 26                  | 25.129            | 3.224           | 24.265            | 0.933           |
| B14    | 4      | 24                  | 22.585            | 3.117           | 21.248            | 0.885           |
| B18    | 4      | 23                  | 21.838            | 3.084           | 20.829            | 0.906           |
| B21    | 4      | 15                  | 13.212            | 2.581           | 11.460            | 0.764           |
| A11    | 1      | 45                  | 42.868            | 3.758           | 40.878            | 0.908           |
| A10    | 1      | 43                  | 40.576            | 3.703           | 38.044            | 0.885           |
| A7     | 1      | 43                  | 40.063            | 3.690           | 37.538            | 0.873           |
| A5     | 1      | 39                  | 37.073            | 3.613           | 35.388            | 0.907           |
| A8     | 1      | 37                  | 34.552            | 3.542           | 32.661            | 0.883           |
| A6     | 1      | 35                  | 33.231            | 3.503           | 31.582            | 0.902           |
| A4     | 1      | 34                  | 32.421            | 3.479           | 31.154            | 0.916           |
| B22    | 1      | 34                  | 32.986            | 3.496           | 32.000            | 0.941           |
| A9     | 1      | 31                  | 27.667            | 3.320           | 24.558            | 0.792           |
| B26    | 3      | 36                  | 34.852            | 3.551           | 33.654            | 0.935           |
| C16    | 3      | 33                  | 32.363            | 3.477           | 31.784            | 0.963           |
| C17    | 3      | 33                  | 32.337            | 3.476           | 31.717            | 0.961           |
| B25    | 3      | 31                  | 29.191            | 3.374           | 27.268            | 0.880           |
| B3     | 3      | 31                  | 27.791            | 3.325           | 25.284            | 0.816           |
| A2     | 3      | 30                  | 28.824            | 3.361           | 27.769            | 0.926           |
| B29    | 3      | 28                  | 27.196            | 3.303           | 26.256            | 0.938           |
| B27    | 3      | 27                  | 26.366            | 3.272           | 25.786            | 0.955           |
| D9     | 3      | 26                  | 25.349            | 3.233           | 24.708            | 0.950           |
| B30    | 3      | 25                  | 24.357            | 3.193           | 23.684            | 0.947           |
| B31    | 3      | 25                  | 24.199            | 3.186           | 23.453            | 0.938           |
| C13    | 3      | 24                  | 22.853            | 3.129           | 21.760            | 0.907           |
| C14    | 3      | 23                  | 21.735            | 3.079           | 20.694            | 0.900           |
| C20    | 3      | 23                  | 21.691            | 3.077           | 20.248            | 0.880           |
| D10    | 3      | 23                  | 22.538            | 3.115           | 22.120            | 0.962           |
| D7     | 3      | 23                  | 22.421            | 3.110           | 21.891            | 0.952           |
| C12    | 3      | 22                  | 20.151            | 3.003           | 18.367            | 0.835           |
| C15    | 2      | 25                  | 24.159            | 3.185           | 23.361            | 0.934           |
| C18    | 2      | 25                  | 24.026            | 3.179           | 23.157            | 0.926           |
| D8     | 2      | 23                  | 22.403            | 3.109           | 21.805            | 0.948           |
| E7     | 2      | 20                  | 18.483            | 2.917           | 17.394            | 0.870           |
| E8     | 2      | 20                  | 18.782            | 2.933           | 17.606            | 0.880           |
| B28    | 2      | 19                  | 18.366            | 2.910           | 17.723            | 0.933           |
| D13    | 2      | 19                  | 17.769            | 2.877           | 16.667            | 0.877           |
| A12    | 2      | 18                  | 17.292            | 2.850           | 16.690            | 0.927           |
| C22    | 2      | 18                  | 17.595            | 2.868           | 17.225            | 0.957           |
| C23    | 2      | 18                  | 17.328            | 2.852           | 16.794            | 0.933           |
| B10    | 2      | 17                  | 15.969            | 2.771           | 15.144            | 0.891           |
| D12    | 2      | 17                  | 16.540            | 2.806           | 16.011            | 0.942           |
| E11    | 2      | 17                  | 16.170            | 2.783           | 15.333            | 0.902           |
| B6     | 2      | 16                  | 14.843            | 2.698           | 13.828            | 0.864           |
| D6     | 2      | 16                  | 15.724            | 2.755           | 15.429            | 0.964           |
| E9     | 2      | 16                  | 15.346            | 2.731           | 14.815            | 0.926           |
| B5     | 2      | 15                  | 14.128            | 2.648           | 13.448            | 0.897           |
| C21    | 2      | 15                  | 14.715            | 2.689           | 14.459            | 0.964           |
| D14    | 2      | 15                  | 13.946            | 2.635           | 12.737            | 0.849           |
| D11    | 2      | 14                  | 13.093            | 2.572           | 12.423            | 0.887           |
| E12    | 2      | 14                  | 12.678            | 2.540           | 11.435            | 0.817           |
| B7     | 6      | 22                  | 19.754            | 2.983           | 17.723            | 0.806           |
| D15    | 6      | 22                  | 21.208            | 3.054           | 20.485            | 0.931           |
| E15    | 6      | 18                  | 17.508            | 2.863           | 17.017            | 0.945           |
| C25    | 6      | 16                  | 15.539            | 2.743           | 15.059            | 0.941           |
| C8     | 6      | 15                  | 14.331            | 2.662           | 13.554            | 0.904           |
| E13    | 6      | 15                  | 14.246            | 2.656           | 13.667            | 0.911           |
| B11    | 6      | 14                  | 13.377            | 2.594           | 12.800            | 0.914           |
| C24    | 6      | 13                  | 12.364            | 2.515           | 11.879            | 0.914           |
| B4     | 6      | 12                  | 10.402            | 2.342           | 9.135             | 0.761           |
| E14    | 6      | 12                  | 11.182            | 2.414           | 10.593            | 0.883           |
| B32    | 6      | 11                  | 10.777            | 2.377           | 10.565            | 0.960           |
| E6     | 6      | 11                  | 10.325            | 2.335           | 9.800             | 0.891           |
| C3     | 6      | 10                  | 8.916             | 2.188           | 7.674             | 0.767           |
| C26    | 6      | 7                   | 6.868             | 1.927           | 6.750             | 0.964           |
| E10    | 6      | 7                   | 6.679             | 1.899           | 6.429             | 0.918           |
| E2     | 6      | 7                   | 6.650             | 1.895           | 6.400             | 0.914           |
| C6     | 6      | 5                   | 4.779             | 1.564           | 4.592             | 0.918           |
| C10    | 5      | 10                  | 9.325             | 2.233           | 8.805             | 0.880           |
| B1     | 5      | 8                   | 7.325             | 1.991           | 6.818             | 0.852           |
| B9     | 5      | 8                   | 7.579             | 2.025           | 7.143             | 0.893           |
| C4     | 5      | 6                   | 5.744             | 1.748           | 5.538             | 0.923           |
| B16    | 5      | 5                   | 4.924             | 1.594           | 4.840             | 0.968           |
| C7     | 5      | 5                   | 4.745             | 1.557           | 4.545             | 0.909           |
| D1     | 5      | 2                   | 2.000             | 0.693           | 2.000             | 1.000           |
| E5     | 5      | 2                   | 2.000             | 0.693           | 2.000             | 1.000           |
| B8     | 7      | 3                   | 2.872             | 1.055           | 2.778             | 0.926           |
| C11    | 7      | 2                   | 2.000             | 0.693           | 2.000             | 1.000           |
| C5     | 7      | 2                   | 2.000             | 0.693           | 2.000             | 1.000           |
| C9     | 7      | 2                   | 2.000             | 0.693           | 2.000             | 1.000           |
| C2     | 7      | 1                   | 1.000             | 0.000           | 1.000             | 1.000           |
| D2     | 7      | 1                   | 1.000             | 0.000           | 1.000             | 1.000           |

Coordonnées dGPS de l'angle inférieur gauche des relevés (1m<sup>2</sup>)

| Relevé | X         | Y         | Z       |
|--------|-----------|-----------|---------|
| A1     | 574050.97 | 119518.82 | 1524.91 |
| A2     | 574019.94 | 119478.71 | 1530.14 |
| A3     | 573969.19 | 119418.13 | 1537.74 |
| A4     | 573953.67 | 119398.82 | 1540.65 |
| A5     | 573933.74 | 119371.76 | 1543.97 |
| A6     | 573902.42 | 119335.59 | 1548.84 |
| A7     | 573880.64 | 119309.73 | 1551.45 |
| A8     | 573854.89 | 119279.47 | 1554.16 |
| A9     | 573835.05 | 119254.77 | 1557.74 |
| A10    | 573813.65 | 119227.16 | 1560.25 |
| A11    | 573791.36 | 119198.72 | 1562.05 |
| A12    | 573726.48 | 119112.79 | 1567.61 |
| B1     | 574082.61 | 119407.86 | 1542.08 |
| B2     | 574077.11 | 119405.72 | 1541.89 |
| B3     | 574073.66 | 119403.22 | 1542.82 |
| B4     | 574060.66 | 119396.58 | 1544.60 |
| B5     | 574047.57 | 119389.50 | 1544.58 |
| B6     | 574038.25 | 119378.38 | 1546.62 |
| B7     | 574029.50 | 119366.66 | 1549.20 |
| B8     | 574019.91 | 119354.11 | 1550.56 |
| B9     | 574015.58 | 119348.00 | 1551.88 |
| B10    | 574001.53 | 119327.59 | 1555.15 |
| B11    | 573997.95 | 119321.94 | 1556.94 |
| B12    | 573980.94 | 119303.28 | 1560.66 |
| B13    | 573974.63 | 119293.86 | 1561.53 |
| B14    | 573968.79 | 119283.76 | 1563.21 |
| B15    | 573963.06 | 119273.96 | 1564.79 |
| B16    | 573960.22 | 119270.08 | 1563.47 |
| B17    | 573954.11 | 119262.96 | 1568.18 |
| B18    | 573945.58 | 119245.71 | 1575.15 |
| B19    | 573935.28 | 119229.96 | 1575.27 |
| B20    | 573924.93 | 119211.45 | 1575.27 |
| B21    | 573917.46 | 119202.90 | 1566.94 |
| B22    | 573904.96 | 119177.81 | 1575.22 |
| B23    | 573897.43 | 119160.81 | 1576.51 |
| B24    | 573885.22 | 119144.98 | 1580.96 |
| B25    | 573873.33 | 119130.18 | 1583.27 |
| B26    | 573859.91 | 119115.52 | 1583.70 |
| B27    | 573850.03 | 119103.33 | 1583.89 |
| B28    | 573843.50 | 119096.88 | 1586.00 |
| B29    | 573836.82 | 119089.58 | 1585.92 |
| B30    | 573830.09 | 119082.53 | 1585.90 |
| B31    | 573818.65 | 119069.82 | 1585.81 |
| B32    | 573809.26 | 119058.34 | 1587.12 |

| Relevé | X         | Y         | Z       |
|--------|-----------|-----------|---------|
| C1     | 574086.01 | 119216.92 | 1578.18 |
| C2     | 574073.79 | 119206.50 | 1582.20 |
| C3     | 574058.32 | 119189.15 | 1586.38 |
| C4     | 574053.98 | 119184.11 | 1587.89 |
| C5     | 574049.14 | 119178.08 | 1589.22 |
| C6     | 574044.30 | 119171.79 | 1590.90 |
| C7     | 574038.20 | 119164.73 | 1590.26 |
| C8     | 574033.65 | 119160.47 | 1591.93 |
| C9     | 574030.83 | 119155.91 | 1592.53 |
| C10    | 574024.91 | 119147.92 | 1595.32 |
| C11    | 574019.98 | 119141.70 | 1594.47 |
| C12    | 574009.26 | 119128.33 | 1598.19 |
| C13    | 573999.63 | 119117.04 | 1599.70 |
| C14    | 573991.06 | 119105.24 | 1601.72 |
| C15    | 573982.73 | 119093.05 | 1604.55 |
| C16    | 573974.06 | 119081.70 | 1605.38 |
| C17    | 573964.94 | 119070.58 | 1605.62 |
| C18    | 573956.97 | 119058.30 | 1608.01 |
| C19    | 573945.51 | 119041.36 | 1609.35 |
| C20    | 573936.40 | 119029.72 | 1611.52 |
| C21    | 573928.57 | 119017.77 | 1612.76 |
| C22    | 573923.79 | 119011.79 | 1612.45 |
| C23    | 573921.83 | 119008.71 | 1612.84 |
| C24    | 573915.37 | 118998.52 | 1614.32 |
| C25    | 573912.42 | 118992.71 | 1612.74 |
| C26    | 573910.61 | 118988.93 | 1613.98 |
| D1     | 574077.91 | 119009.03 | 1633.15 |
| D2     | 574076.24 | 119007.18 | 1633.75 |
| D3     | 574071.53 | 119002.65 | 1633.38 |
| D4     | 574068.56 | 118999.58 | 1634.50 |
| D5     | 574064.11 | 118994.02 | 1637.03 |
| D6     | 574060.61 | 118990.17 | 1637.90 |
| D7     | 574053.78 | 118981.05 | 1640.38 |
| D8     | 574047.24 | 118973.39 | 1641.27 |
| D9     | 574041.49 | 118965.19 | 1642.18 |
| D10    | 574035.37 | 118957.19 | 1642.29 |
| D11    | 574028.58 | 118950.29 | 1644.23 |
| D12    | 574014.57 | 118933.80 | 1644.93 |
| D13    | 574006.51 | 118925.05 | 1643.57 |
| D14    | 574000.19 | 118917.85 | 1645.03 |
| D15    | 573995.11 | 118910.05 | 1642.87 |
| E1     | 574084.17 | 118913.13 | 1662.48 |
| E2     | 574082.58 | 118911.06 | 1662.24 |
| E3     | 574079.88 | 118907.50 | 1661.33 |
| E4     | 574077.58 | 118904.44 | 1662.26 |
| E5     | 574075.19 | 118901.52 | 1665.16 |
| E6     | 574074.08 | 118898.56 | 1665.24 |
| E7     | 574070.74 | 118893.29 | 1667.24 |
| E8     | 574068.21 | 118889.04 | 1667.34 |
| E9     | 574065.67 | 118885.01 | 1668.11 |
| E10    | 574062.97 | 118880.87 | 1666.80 |
| E11    | 574060.25 | 118876.77 | 1666.34 |
| E12    | 574057.89 | 118872.54 | 1666.56 |
| E13    | 574052.73 | 118865.47 | 1663.42 |
| E14    | 574049.65 | 118860.08 | 1664.69 |
| E15    | 574045.68 | 118854.83 | 1664.39 |

Inventaire floristique – Section A

| Date         | Nom SFS | Abréviations | Code SFS | A1   |    | A2    |       | A3    |       | A4    |       | A5    |       | A6    |       | A7    |       | A8    |       | A9    |       | A10   |       | A11   |       | A12   |       |       |       |       |       |   |
|--------------|---------|--------------|----------|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
|              |         |              |          | 6/09 |    | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 | 71/08 | 21/08 |   |
|              |         |              |          |      |    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |   |
| Herbes [%]   |         |              |          | 0.1  | 60 | 95.9  | 91    | 92.9  | 87.9  | 95.9  | 89    | 90    | 95.9  | 89    | 90    | 95.9  | 89    | 90    | 95.9  | 89    | 90    | 95.9  | 89    | 90    | 95.9  | 89    | 90    | 95.9  | 89    | 90    |       |   |
| Arbustes [%] |         |              |          | 0    | 10 | 8     | 2     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |       |   |
| Mosses [%]   |         |              |          | 0    | 15 | 1     | 0     | 2     | 7     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 2     |   |
| Sols [%]     |         |              |          | 97.8 | 20 | 0.1   | 1     | 0     | 0     | 0.1   | 0     | 0.1   | 0     | 0     | 0.1   | 0     | 0     | 0     | 0.1   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.1   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |   |
| Litière [%]  |         |              |          | 0.1  | 25 | 0.1   | 3     | 7     | 5     | 4     | 4     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3 |

1 30 32 33 35 38 35 42 36 30 42 44 18



# Inventaire floristique – Section C

| Statut        | Code   | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 | C17 | C18 | C19 | C20 | C21 | C22 | C23 | C24 | C25 | C26 | C27 | C28 | C29 | C30 | C31 | C32 | C33 | C34 | C35 | C36 | C37 | C38 | C39 | C40 | C41 | C42 | C43 | C44 | C45 | C46 | C47 | C48 | C49 | C50 | C51 | C52 | C53 | C54 | C55 | C56 | C57 | C58 | C59 | C60 | C61 | C62 | C63 | C64 | C65 | C66 | C67 | C68 | C69 | C70 | C71 | C72 | C73 | C74 | C75 | C76 | C77 | C78 | C79 | C80 |
|---------------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Maniféstation | Statut | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 | C14 | C15 | C16 | C17 | C18 | C19 | C20 | C21 | C22 | C23 | C24 | C25 | C26 | C27 | C28 | C29 | C30 | C31 | C32 | C33 | C34 | C35 | C36 | C37 | C38 | C39 | C40 | C41 | C42 | C43 | C44 | C45 | C46 | C47 | C48 | C49 | C50 | C51 | C52 | C53 | C54 | C55 | C56 | C57 | C58 | C59 | C60 | C61 | C62 | C63 | C64 | C65 | C66 | C67 | C68 | C69 | C70 | C71 | C72 | C73 | C74 | C75 | C76 | C77 | C78 | C79 | C80 |
| 0             | 1      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | 53  | 54  | 55  | 56  | 57  | 58  | 59  | 60  | 61  | 62  | 63  | 64  | 65  | 66  | 67  | 68  | 69  | 70  | 71  | 72  | 73  | 74  | 75  | 76  | 77  | 78  | 79  | 80  |     |





Caractéristiques phyto-sociologiques des groupes

Table with columns for 'Nom IFIS', 'Abbréviation', 'Code BPS', 'Fréq.', 'Max. Groupe', 'Fréquence relative', 'Abondance moyenne', 'Discrim.', 'Tab. discrimin. (discrim. Abondance moyenne)', 'IndGr', 'Valeur indicatrice', 'Pval', and 'Abondance relative'. The table lists numerous plant species and their associated sociological characteristics across various sites.