



**HAL**  
open science

# Analyse des conditions topo-géomorphologiques qui influencent la progression altitudinale de la limite supérieure des arbres dans les Pyrénées orientales françaises

Olivier Theureaux

► **To cite this version:**

Olivier Theureaux. Analyse des conditions topo-géomorphologiques qui influencent la progression altitudinale de la limite supérieure des arbres dans les Pyrénées orientales françaises. Université de Paris / Université Paris Diderot (Paris 7). 2022. hal-04692882

**HAL Id: hal-04692882**

**<https://hal.science/hal-04692882v1>**

Submitted on 10 Sep 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open licence - etalab

Université Paris Cité  
UFR Géographie, Histoire et Sciences de la Société  
Master Dynamique des Milieux et Risques (DYNARISK)  
Année universitaire 2021-2022  
Mémoire de master 2, présenté par Olivier Theureaux  
Numéro d'étudiant : 22014379

**Analyse des conditions topo-géomorphologiques qui influencent la progression altitudinale de la limite supérieure des arbres dans les Pyrénées orientales françaises.**



*Photographie : D. Birre, 2021*

Stage au sein de l'UMR Ladyss sous la direction de Thierry Feuillet  
Objet du stage : Construction d'une base de données spatialisées et mise en place d'un *dashboard* dans le cadre d'un projet de recherche en biogéographie alpine.



*« Ainsi, grâce à la distribution des forêts et des pâturages, on peut lire de loin quelques-uns des secrets de la montagne, pourvu, du moins, que l'homme ne soit pas intervenu brutalement en abattant les arbres et en modifiant l'aspect du mont. »*  
*Reclus E., (1880), Histoire d'une montagne, p. 130*

# Remerciements

Je tiens à remercier Thierry Feuillet et Déborah Birre de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur la dynamique de la forêt pyrénéenne. Merci pour vos conseils, votre disponibilité et votre accompagnement inestimable tout au long du stage.

Je suis aussi très reconnaissant pour les échanges et toutes les aides reçues de la part de Paul Passy. Ces cinq mois de recherche se sont déroulés dans un cadre confortable au sein d'une belle équipe. Merci également au laboratoire Géotéca pour l'accueil et les ressources matérielles qui m'ont offert un espace de travail agréable et convivial.

Merci à mes camarades du master 2 « Dynarisk » de l'Université Paris Cité avec qui j'ai partagé cette dernière étape importante vers le métier de géographe.

Merci, enfin, à tous mes proches pour leur soutien et leur écoute. Je sais la chance que j'ai de vous avoir à mes côtés. Merci de m'avoir soutenu tout au long de ma reconversion.

# Résumé

Depuis des décennies, les températures augmentent spécialement dans les espaces de montagne (GIEC, 2021). Notre étude a porté sur la forêt subalpine, à la jonction entre les étages subalpins et alpins. Nous avons étudié sa mobilité à l'aide de données raster, mais aussi de certains indicateurs topographiques et morphologiques qui orientent sa dynamique. Les facteurs topographiques résultent de la configuration du terrain, de l'organisation des montagnes à l'échelle régionale aux accidents de terrain pour l'échelle locale. Nous avons caractérisé onze facteurs topographiques qui sont supposés influencer, à l'échelle locale, la progression altitudinale de la limite supérieure des arbres dans les Pyrénées Orientales françaises. Nous avons également caractérisé les formes du paysage à l'aide de l'algorithme *Geomorphons*. Cette étude a permis de trouver des liens statistiques entre, d'une part, l'altitude et la dynamique de colonisation forestière et d'autre part entre la présence de "creux de versant" et cette même dynamique. Même si les espaces étudiés font finalement partie d'un système complexe, contre-intuitif, multifactoriel, qui reste complexe à lire, l'utilisation des SIG et des statistiques permet de mieux comprendre leur fonctionnement et de proposer des pistes de compréhension sur la dynamique de l'*Alpine Treeline Ecotone* dans les Pyrénées.

**Mots clés** : Pyrénées, *treeline*, écologie, biogéographie, changement climatique, topographie, géomorphologie, rasters, SIG, télédétection, langage R, géomorphons

# Abstract

For decades, temperatures have been rising especially in mountain areas (IPCC, 2021). Our study focused on the subalpine forest, at the junction between the subalpine and alpine levels. We studied its mobility using raster data, but also some topographic and morphological indicators that guide its dynamics. The topographic factors result from the configuration of the terrain, from the organisation of the mountains on a regional scale to the terrain's accidents on a local scale. We characterised eleven topographic factors that are supposed to influence, at the local scale, the altitudinal progression of the upper tree line in the French Eastern Pyrenees. We also characterised the landscape shapes using the *Geomorphons* algorithm. This study made it possible to find statistical links between, on the one hand, the altitude and the colonisation dynamics and, on the other hand, between the presence of "slope hollows" and these same dynamics. Even if the areas studied are ultimately part of a complex, counter-intuitive, multifactorial system, which remains complex to read, the use of GIS and statistics makes it possible to better understand how they function and to propose avenues for understanding the dynamics of the *Alpine Treeline Ecotone* in the Pyrenees.

**Keywords** : Pyrenees, treeline, ecology, biogeography, climate change, topography, geomorphology, rasters, GIS, remote sensing, R language, geomorphons

# Sommaire

<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>Résumé</b>	<b>4</b>
<b>Sommaire</b>	<b>5</b>
<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>Partie I - Forêt subalpine : définition et facteurs de contrôle</b>	<b>10</b>
A – La forêt subalpine : définitions, historique de recherche, enjeux sur la biodiversité	10
1 - La limite de l'arbre : définitions et formes de l' <i>Alpine Treeline Ecotone</i>	10
2 - Historique de la recherche sur la <i>treeline</i>	11
3 - Enjeux bioclimatiques et écosystémiques	12
a - La <i>treeline</i> et le réchauffement climatique	12
b - Maintien des services écosystémiques	13
B – Les facteurs climato-topo-géomorphologiques et la dynamique de la <i>treeline</i>	14
1 - Le climat, facteur de contrôle majeur à l'échelle régionale	14
2 - A l'échelle locale, les conditions topo-géomorphologiques affectent la dynamique de la <i>treeline</i>	15
Conclusion de la partie I	<b>16</b>
<b>Partie II – Méthodologie : Caractérisation des facteurs topo-géomorphologiques pour une meilleure compréhension de la dynamique de la <i>treeline</i> pyrénéenne</b>	<b>18</b>
A - Contexte géographique	18
1 – Le massif pyrénéen oriental	18
2 – La <i>treeline</i> pyrénéenne et les pins à crochets	19
B – Caractérisation de la dynamique de la <i>treeline</i> et analyse topo-géomorphologique	20
1 - Jeux de données mis à disposition au début du stage	21
a - Localisation de la <i>treeline</i> par un fichier vecteur composé de 656 parcelles	21
b - Etude de la dynamique à partir de fichiers rasters	22
2 – Etape 1 : Caractérisation de la dynamique par analyse diachronique	23
3 – Etape 2 : 11 indicateurs pour l'analyse de la topographie	25
a - Le MNT RGE ALTI® 1m, base des indicateurs topo-géomorphologiques	25
b – Traitements basés sur la topographie	26
c – Traitements basés sur la visibilité : <i>Sky view factor</i> et <i>visible sky</i>	28
4 – Etape 3 : <i>Geomorphons</i> pour l'analyse des formes du terrain	29
a - Les formes étudiées : ravines et les talwegs	29
b - L'algorithme <i>Geomorphons</i>	31
c - Validation de la classification	34
C – Relations statistiques entre les variables topo-géomorphologiques et la variable colonisation	36
Conclusion de la partie II	<b>37</b>

<b>Partie III – Résultats</b>	<b>38</b>
A - L'analyse diachronique de la <i>treeline</i>	38
1 - Catégorisation et comptabilisation des pixels	38
2 - Comparaison de dynamique diachronique de la <i>treeline</i>	39
B - Les indicateurs topographiques dérivés du MNT	40
C - L'analyse des géomorphons	42
1 - Proportion de géomorphons par valeur de rayon de recherche	42
2 - Statistiques descriptives des géomorphons sur un rayon de recherche de 30 pixels	43
3 - Validation de la classification	45
D - Modèle statistique : importance de l'altitude et des géomorphons comme variables explicatives de l'évolution de la <i>treeline</i>	47
Conclusion de la partie III	<b>49</b>
<b>Partie IV – Discussion</b>	<b>50</b>
A - Quelles explications apporter à nos résultats ?	50
1 - Pistes de réflexion sur les "espaces en creux"	50
b - Dynamique de colonisation : l'importance des activités humaines	51
B - Limites des méthodes utilisées	52
1 - La caractérisation des formes du paysage comme première approche	52
2 - Optimisation des analyses statistiques : de l'unité parcelle à l'unité pixel	53
<b>Conclusion générale</b>	<b>55</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>56</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>63</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>64</b>

# Introduction

Depuis des décennies, les températures augmentent et les climats de haute altitude subissent le réchauffement planétaire avec plus d'intensité que les espaces de plaine (Walther *et al.*, 2002 ; GIEC, 2021). Ces changements climatiques rapides touchent fortement la biodiversité alpine, qui dispose d'une richesse faunistique et floristique importante, aujourd'hui en grand danger (Evans et Clague, 1994). Le changement climatique pourrait entraîner des conséquences écologiques graves pour la végétation et les espèces animales des régions alpines, et même entraîner des boucles positives de réchauffement liées à la réduction de l'albédo (Chapin *et al.*, 2005). Pour ces raisons, les régions montagneuses apparaissent comme des espaces cruciaux pour l'étude de l'impact du changement climatique sur la végétation.

Dans ce contexte de réchauffement climatique, les espaces forestiers de montagne sont affectés par la hausse des températures et la forêt progresse en altitude comme en latitude. La colonisation est favorisée par des températures plus élevées faisant remonter l'ensemble du couvert forestier (Feuillet *et al.*, 2020), conduisant à (i) une diminution des espaces de pelouses alpines présentant une richesse spécifique élevée, (ii) la modification des services écosystémiques, qui bénéficient aux espaces forestiers et aux sociétés humaines, telles que la production de bois ou la protection des sols. Outre le changement climatique, qui affecte la végétation de montagne à l'échelle globale, rappelons que les régions montagneuses européennes sont également sous l'emprise de changements démographiques, sociaux et économiques (Ameztegui *et al.*, 2010). Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, la déprise agropastorale massive conduit ainsi à la remontée rapide de la forêt sur les versants.

Dans ce cadre, notre étude porte plus précisément sur la forêt subalpine (à la jonction entre les étages subalpins et alpins) pour identifier sa mobilité à l'aide de certains indicateurs topographiques et morphologiques qui orientent sa dynamique. Un espace va particulièrement attirer notre attention : l'*Alpine Treeline Ecotone (ATE)*. Par souci de simplification, nous utiliserons dans cet exposé le terme de *treeline*. Cet écotone - zone de transition entre deux biomes - est compris entre la limite supérieure de la forêt fermée, que l'on retrouve dans la littérature anglo-saxonne sous le terme *timberline*, et la ligne des derniers arbres isolés, la *tree-species line* (Körner, 1999).

Ainsi, la dynamique spatiale de la végétation de montagne est conditionnée par des facteurs topographiques, biologiques et anthropiques (Resler, 2005). Les facteurs topographiques résultent de la configuration du terrain, de l'organisation des montagnes à l'échelle régionale aux accidents de terrain pour l'échelle locale. Ces

marqueurs topographiques affectent les facteurs écologiques (température, précipitations, enneigement, état des sols) (Ozenda, 1982). Ils conditionnent ainsi indirectement la dynamique de la végétation. Ainsi, la topographie influence la position, l'évolution et la dynamique de la *treeline*. Étudier la *treeline* à large échelle tend généralement à gommer toute hétérogénéité (Holtmeier et Broll, 2005). Mais à une échelle plus fine, il est possible d'observer une variété de formes et de variations spatiales et altitudinales. Cette hétérogénéité est notamment due à la forme du paysage (planéité, concavité ou convexité) et à un ensemble de facteurs topographiques (pente, orientation, altitude, etc.) qui exercent une influence sur l'exposition au vent, les effets d'abri, ou les propriétés locales du sol (humidité, ensoleillement, accumulation d'air froid) (Holtmeier, 2009).

De nombreuses études cherchent à comprendre comment la *treeline* est influencée par les facteurs topographiques et les éléments qui en découlent, comme les avalanches (Cullen, 2001 ; Walsh *et al.*, 2003), les facteurs topoclimatiques (Danby, 2007 ; Bader, 2008 ; Case et Buckley, 2015), ou bien encore l'ensoleillement et l'humidité du sol (Resler, 2005 ; Malanson, 2009 ; Guo *et al.*, 2014). Mais, les liens entre la dynamique spatiale de la *treeline* et les facteurs topo-géomorphologiques de la forêt pyrénéenne à une échelle fine sont peu étudiés. L'objectif de ce travail de recherche est de (i) caractériser les facteurs topo-géomorphologiques qui sont supposés influencer, à l'échelle locale, la progression altitudinale de la limite supérieure des arbres dans les Pyrénées Orientales françaises, et (ii) à estimer les liens entre ces facteurs et la colonisation de l'arbre. Ces différents objectifs ont vocation à contribuer à une hiérarchisation de ces facteurs en fonction des configurations locales.

*Nos hypothèses sont les suivantes :*

- L'utilisation de modèles numériques de terrain à haute résolution (1 m) contribue à mieux comprendre la dynamique de l'*Alpine Treeline Ecotone* dans les Pyrénées en permettant de calculer des indicateurs topographiques et géomorphologiques pertinents.
- Plus précisément, les espaces topographiques en creux (torrents, ravines, creux de versant, talwegs) sont des environnements favorables à la colonisation et agissent comme des agents de facilitation de la colonisation de l'arbre.

Ce travail s'intègre au projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) SpatialTreeP (<https://anr.fr/Project-ANR-21-CE03-0002>) et coordonné par Thierry Feuillet (MCF-HDR, Ladyss, Université Paris 8 Vincennes-Saint Denis). Il porte sur la mobilité de la limite supérieure de la forêt subalpine dans les Pyrénées. Il a pour objectif de mieux comprendre les interactions entre changement climatique, mutations anthropiques et effets de site sur la dynamique de la *treeline*.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons tout particulièrement à la topographie et à la géomorphologie à proximité de la *treeline* pyrénéenne en tant qu'agent de sa dynamique spatio-temporelle. Les conditions de site peuvent profondément influencer les vitesses de vent (Oke, 2002 ; Resler, 2005 ; Holtmeier, 2005, 2009 ; McIntire, 2016), ralentir la fonte des neiges (Danby, 2007 ; Bader, 2008 ; Salzer, 2014), apporter de l'humidité (Resler, 2005 ; Malanson, 2009 ; Sullivan, 2010 ; Holtmeier, 2017 ; Körner, 2018 ; Kopecky, 2021), améliorer les conditions d'ensoleillement (Treml, 2008 ; Elliott et Kipfmueller, 2010 ; Leonelli, 2016 ; Morley, 2020 ; proposer des espaces d'abri à la végétation (Batllori, 2009 ; Cudlin, 2017 ; Astudillo, 2019). Nous chercherons ici à caractériser les conditions de site et à définir les liens qui les composent. L'usage des systèmes d'information géographiques (SIG) nous permettra d'utiliser des algorithmes de manière à quantifier un ensemble de facteurs topographiques et géomorphologiques qui joue un rôle dans la mobilité spatiale de la *treeline*. Le travail sera centré plus précisément sur la détection des objets liés aux processus d'érosion que sont les ravines, des formes d'incision avec un escarpement minimum de 50 cm et plus généralement des thalwegs. Ces espaces apparaissent en effet comme des réservoirs d'humidité facilitant l'installation de la végétation, mais aussi des espaces protecteurs offrant de multiples abris aux graines et aux jeunes pousses et enfin des espaces potentiellement moins exposés à la pression pastorale (Ameztegui et al., 2010).

Pour tester nos hypothèses et la méthodologie proposées dans le cadre de ce mémoire, notre étude portera sur les Pyrénées françaises, dans les départements de l'Ariège (09) et des Pyrénées-Orientales (66). Les sites étudiés sont situés entre 970 et 2 470 mètres d'altitude, pour une moyenne de 1 800 mètres, correspondant à l'altitude la *treeline* au sein de cette zone d'étude. Ainsi, dans une première partie, nous ferons un point sur la thématique du changement climatique et les liens entre les facteurs climato-topo-géomorphologiques et la dynamique de la *treeline*. Dans une deuxième et troisième parties, nous présenterons la méthodologie et les résultats avant d'exposer dans une dernière partie les discussions autour de nos résultats.

# Partie I - Forêt subalpine : définition et facteurs de contrôle

Le travail de ce mémoire s'intègre dans un projet de recherche sur la mobilité spatiale de la limite supérieure des arbres. Dans cette première grande partie, nous présenterons tout d'abord l'objet *treeline* et les enjeux bioclimatiques et écologiques qui l'entourent. Dans un second temps, nous présenterons les facteurs climato-topo-géomorphologiques potentiellement associés à sa dynamique et son évolution.

## A – La forêt subalpine : définitions, historique de recherche, enjeux sur la biodiversité

### 1 - La limite de l'arbre : définitions et formes de l'*Alpine Treeline Ecotone*

Aux alentours de 2 300 mètres d'altitude se trouve la limite supérieure de la forêt subalpine, la *treeline*. Cette zone montagneuse se situe entre l'étage subalpin et l'étage alpin. Afin de mieux comprendre les variations spatiales de cette frontière, le travail de ce mémoire porte sur l'écotone *treeline*. Notons que dans un sens plus strict, la *treeline* désigne la ligne qui relie les arbres les plus hauts de la forêt, d'une hauteur supérieure à trois mètres (Körner, 1999, 2012 ; Treml, 2015). Notons également qu'il existe une autre limite, la *timberline*, qui représente la ligne qui relie toutes les marges supérieures de la forêt fermée (Körner, 2012 ; Treml, 2015). Nous parlerons et nous décrirons principalement des dynamiques de l'écotone *treeline* en conservant dans ce travail les anglicismes précédents principalement utilisés dans la littérature presque exclusivement anglo-saxonne (Figure 1).



Figure 1 - La limite de la forêt subalpine dans les environs de Valcebollère (Massif du Puigmal, Pyrénées-Orientales). Photographie : T. Feuillet, 2017

La *treeline* peut prendre plusieurs formes (Bader, 2021) : (i) une forme discrète est une ligne bien identifiable dans le paysage à travers une ligne d'arbres bien dense, contrôlée principalement par les pratiques agro-pastorales ou par le relief, comme un pied de corniche, (ii) une forme diffuse/graduelle, où la couverture d'arbre est décroissante, contrôlée par des contraintes principalement climatiques, (iii) une forme « en îlots », contrôlée par des processus de contraintes/perturbations liées à des facteurs topographiques, biologiques et/ou anthropiques, (iv) une forme composée de *Krummholz*, des arbres sévèrement rabougris ou déformés (Figure 2).

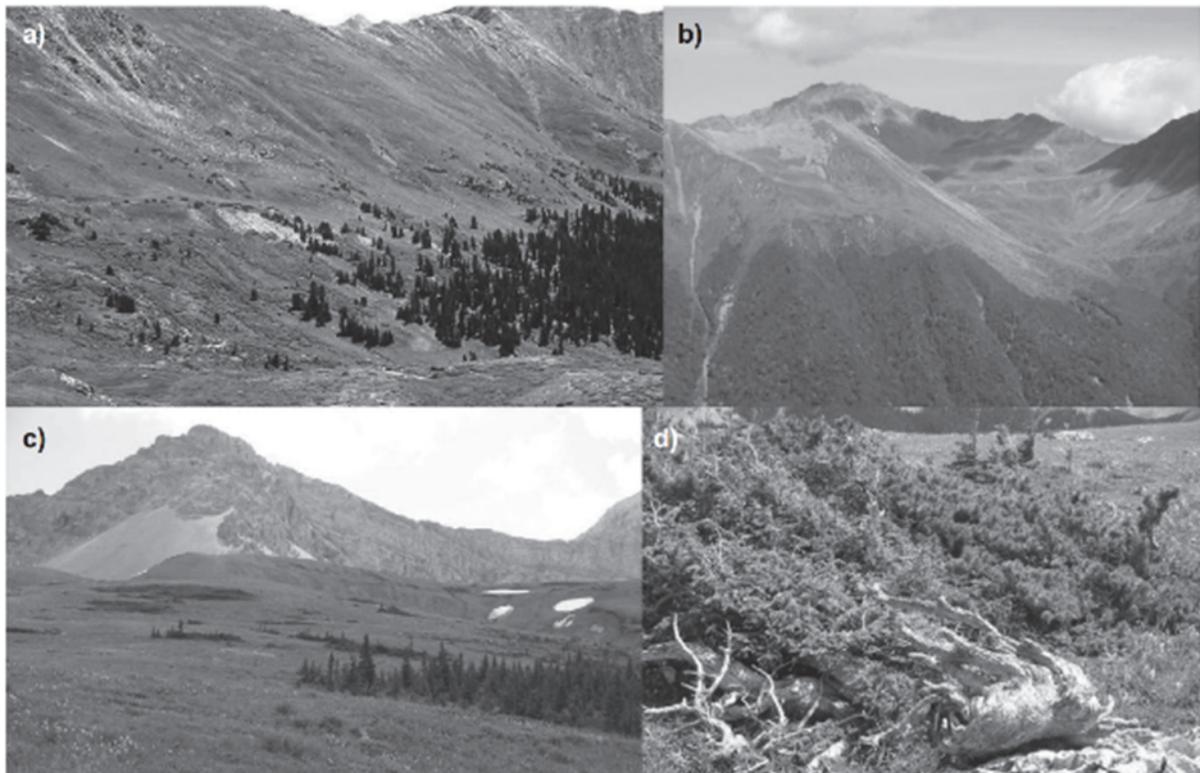


Figure 2 – Les formes de la *treeline* (Harsch et Bader, 2011). (a) Forme diffuse. (b) Forme discrète. (c) Forme en îlot. (d) *Krummholz* (forme de croissance altérée par le vent d'un arbre).

## 2 - Historique de la recherche sur la *treeline*

Les premières études sur le *treeline* commencent à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle avec principalement des explorations de montagnes, des observations, des études sur la végétation et des hypothèses sur l'influence du climat. En 1807, Alexandre de Humboldt est le premier à chercher à comprendre et à présenter la répartition des espèces par système étagé suivant des facteurs bioclimatiques (Figure 3). Ainsi, il nous renseigne sur les limites biogéographiques des écosystèmes depuis les plaines jusqu'aux plus hautes cimes. Dans ce cadre établi, de nombreuses recherches portent sur les limites entre l'étage subalpin et l'étage alpin.

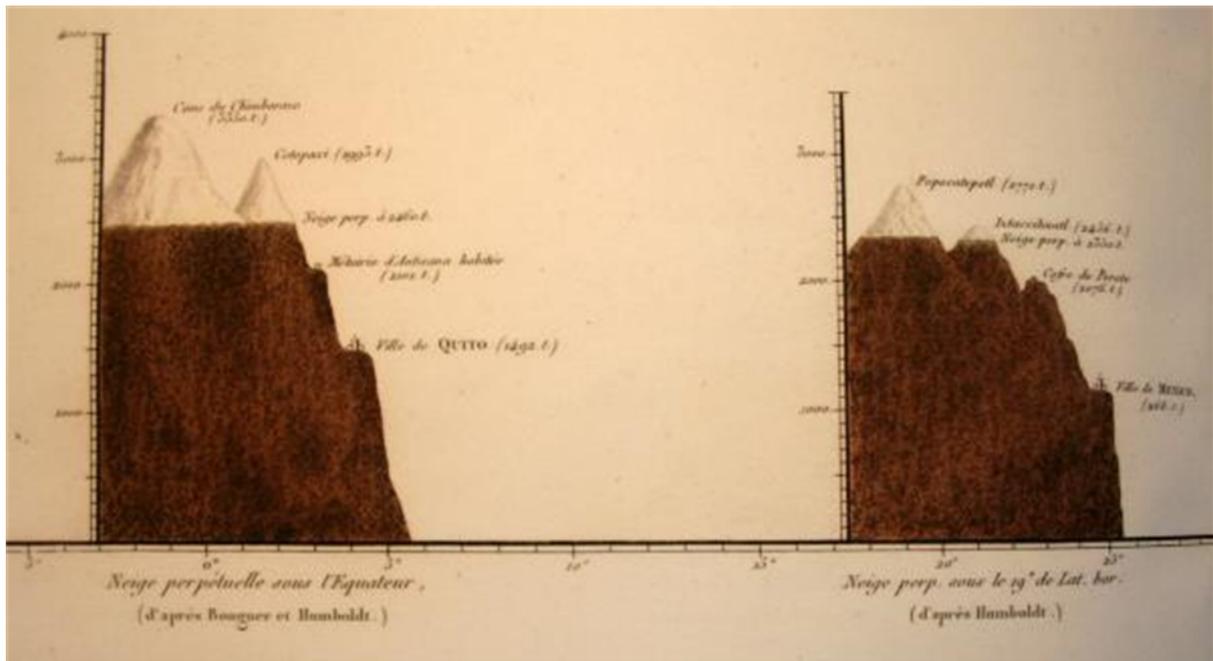


Figure 3 – Limite inférieure des neiges perpétuelles à différentes latitudes. Source : Atlas géographique et physique du nouveau continent, 1814, Paris, F. Schoell.

A partir de 1930, les études s'orientent sur la réponse physiologique des arbres aux conditions chaudes extrêmes et sur les relations entre *treeline* et températures. On étudie alors la longueur de la saison chaude et les températures moyennes (Holtmeier, 2019). Puis l'intérêt des chercheurs s'est de plus en plus concentré sur la dynamique de la *treeline* face au réchauffement climatique. L'intérêt de la recherche scientifique pour la *treeline* est depuis en pleine croissance.

A partir des années 1990, les techniques de télédétection et l'application des systèmes d'information géographique permettent de modéliser la *treeline* et sa réponse au changement climatique. Pour ce faire, on construit des scénarios qui mixent données de terrain et données en laboratoire. C'est aussi le temps des études sur les contraintes environnementales, les impacts du réchauffement sur la biodiversité et l'analyse des services écosystémiques des forêts de haute altitude.

### 3 - Enjeux bioclimatiques et écosystémiques

#### a - La *treeline* et le réchauffement climatique

Le changement climatique conduit à des changements dans la position des forêts à travers le monde (Posch et Kauppi, 1991 ; Borel et Ozenda, 1991). Il mène à des conditions favorables pour le recrutement et le développement de la *treeline* (MacDonald, 1998 ; Camarero & Gutiérrez, 2004 ; Batllori & Gutiérrez, 2008), ce qui implique des répercussions sur la biodiversité et sur le fonctionnement des écosystèmes.

Il existe aussi des liens forts entre la position de la *treeline*, les dynamiques qu'elle subit et les formes qu'elle adopte (Harsch et Bader, 2011; Bader *et al.*, 2021, Birre, 2022). Identifier et comprendre ces liens permet d'explorer les mécanismes de réponse de la *treeline* au changement climatique. Par ailleurs, la hausse des températures induit une accélération des changements en montagne (Walther *et al.*, 2002), qui elle-même peut conduire à s'intéresser de manière croissante à l'ensemble de ces dynamiques.

#### b - Maintien des services écosystémiques

L'impact du changement climatique et des usages anthropiques entraînent des conséquences sur la biodiversité (Theurillat et Guisan, 2001). Or, la forêt subalpine propose différents services (Figure 4) : protection contre l'érosion et les mouvements gravitaires (chutes de pierre, inondations, avalanches), aspects touristiques (paysages, espaces de loisirs), activités agro-pastorales (pâturage, sylviculture, construction), conservation de la nature et de la biodiversité (Holtmeier et Broll, 2018).

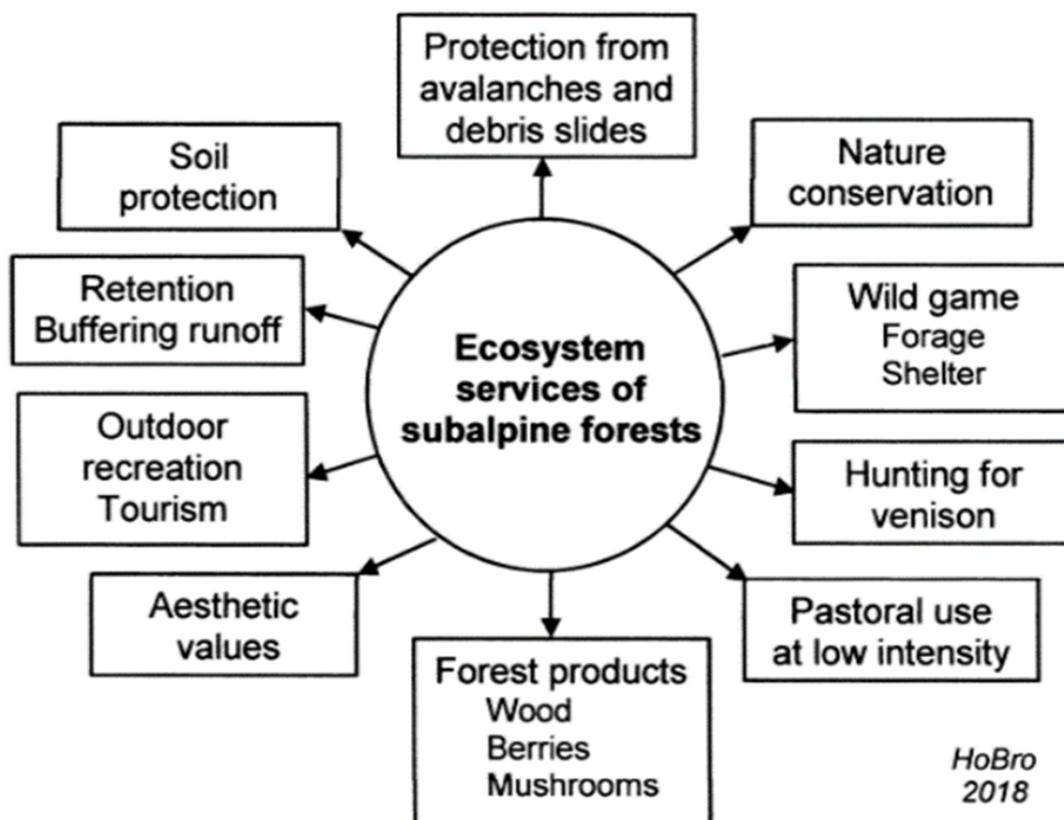


Figure 4 - Les services écosystémiques de la forêt subalpine (Holtmeier, 2018)

Afin de préserver ces services, les forêts alpines doivent être maintenues en bonne santé. Dans la mesure du possible, les activités pastorales doivent être

contrôlées et les populations d'animaux sauvages régulées, afin de permettre aux forêts de continuer à apporter leur protection et de garantir le maintien de l'ensemble des services écosystémiques indispensables au bon développement de nos sociétés. Même si les plantes des régions alpines sont particulièrement robustes face au changement climatique, les sociétés humaines le sont beaucoup moins (Körner, 2021).

## B – Les facteurs climato-topo-géomorphologiques et la dynamique de la *treeline*

La limite supérieure de l'arbre est un espace qui évolue dans le temps et dans l'espace (Holtmeier et Broll, 2005). L'échelle spatiale joue un rôle important dans sa compréhension. Les facteurs influençant la structure de la *treeline* sont nombreux (Figure 5). Resler (2006), montre qu'ils sont variés, qu'ils s'emboîtent et qu'ils ne sont pas les mêmes en fonction de l'échelle d'étude.

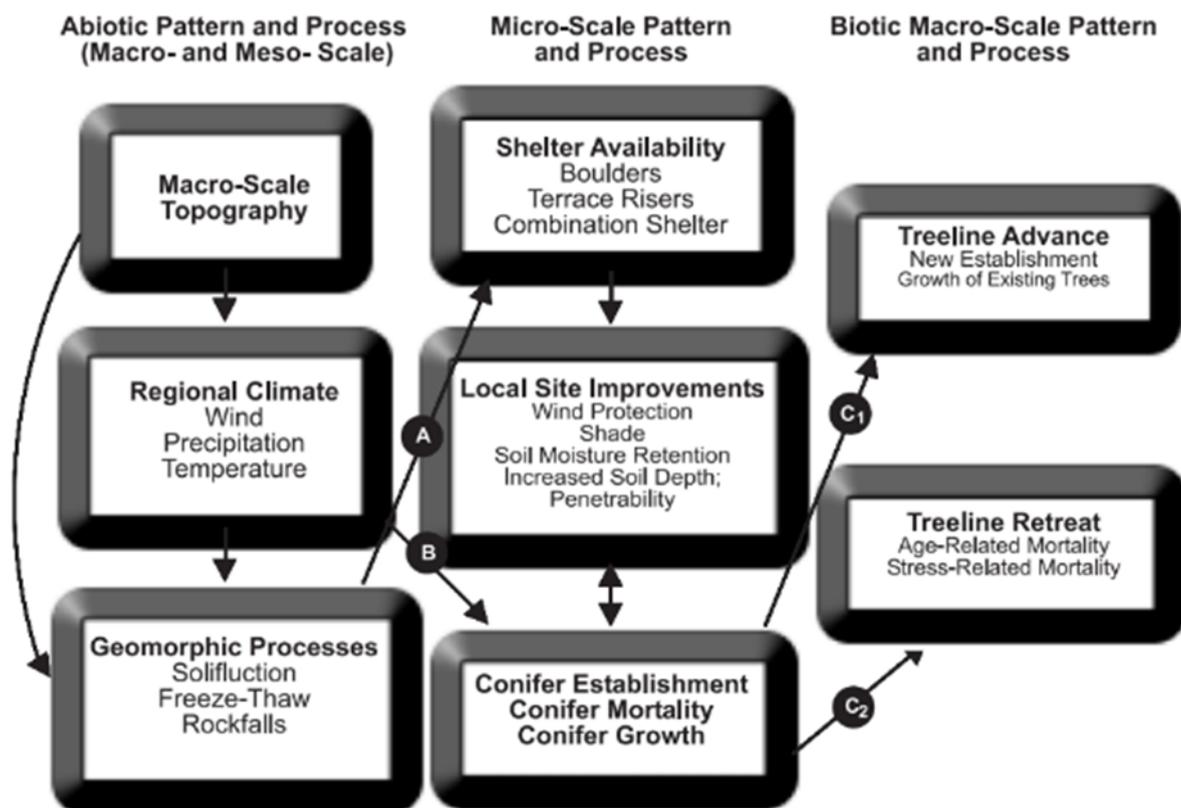


Figure 5 – Approche bio-géomorphologique des dynamiques de la *treeline* (Resler, 2006)

### 1 - Le climat, facteur de contrôle majeur à l'échelle régionale

A l'échelle globale, l'importance des températures dans le contrôle de la distribution spatiale des forêts de montagne est étudiée et comprise depuis plusieurs siècles (von Humboldt and Bonpland, 1807 ; Brockmann-Jerosch, 1919 ; Hermes,

1955). Plus exactement, des températures suffisamment chaudes pendant la période de croissance sont primordiales pour que la forêt puisse se développer (Körner et Paulsen, 2004 ; Hoch et Körner, 2009). Il est ainsi possible, à une échelle globale, de positionner la limite de la *treeline*. A cette échelle lissée, le climat gouverne la position de l'*Alpine Treeline Line* : “*At coarse spatial and temporal scales, growing season temperature governs the positions of arctic and alpine treelines and limits the growth of trees at tree lines worldwide*” (Körner and Paulsen, 2004). Ainsi, l'altitude moyenne de la *treeline* est obtenue par l'étude des températures estivales moyennes et par la longueur minimum de la période végétative. En région tempérée, l'altitude de la *treeline* en montagne est associée à des températures estivales comprises entre 7 et 8°C.

Mais la dynamique de la ligne supérieure des arbres n'est pas aussi claire. Des interactions locales entre des facteurs biotiques et abiotiques peuvent modifier la dynamique régionale (Weisberg, 1995). Pour Holtmeier et Broll (2005), ce sont les impacts humains et les caractéristiques du terrain qui contrôlent la limite de l'arbre à une échelle locale. Ce qui suppose que d'autres facteurs entrent en scène dans l'explication des variations spatiales, comme par exemple l'orientation des pentes, l'humidité du sol, l'exposition au vent ou bien encore l'altitude de la *treeline*. Case et Duncan (2014) montre que si la *treeline* était uniquement gouvernée par les températures, elle formerait une ligne stricte. Or, ce n'est pas le cas. Il existe de nombreuses variations possibles.

## 2 - A l'échelle locale, les conditions topo-géomorphologiques affectent la dynamique de la *treeline*

Nous l'avons vu, le climat est le facteur dominant à l'échelle globale (Holtmeier et Broll, 2005), mais des facteurs topo-géomorphologiques entrent en ligne de compte à l'échelle locale. Ainsi, quels sont les facteurs de contrôle qui expliquent la position et la forme de la *treeline* à l'échelle locale ? Nous trouvons dans la littérature des réponses se basant principalement sur l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT) afin de quantifier différents indicateurs topographiques (pente, orientation, topographie, etc.). Il existe plusieurs facteurs topographiques à prendre en compte.

Le facteur pente est associé à la *treeline* car les arbres s'implantent plus facilement sur de faibles pentes. Morley (2020) montre que la colonisation est plus efficace sur les pentes de 0 à 20° car ces espaces sont moins balayés par les avalanches et disposent de sols stabilisés avec suffisamment de matières minérales et organiques conduisant à l'amélioration des conditions d'humidité et de bonne santé (Holtmeier et Broll, 2010a). Aussi, Mihaila (2021) observe des régressions de *timberline* dans les versants à forte pente 30-40°. Cela s'explique par de forts événements torrentiels et une plus forte intensité des processus gravitaires. Ainsi,

les pentes influencent la formation des sols, l'érosion, humidité du sol, l'instabilité et les processus gravitaires (Leonelli, 2016)

L'orientation joue également un rôle important. Elliott et Kipfmüller (2010) ont montré dans les Rocheuses que l'orientation influence la colonisation. Stueve *et al.* (2011) relèvent que l'orientation favorise l'ensoleillement et donc le développement de la végétation. Par ailleurs, dans un contexte de changement climatique, les versants sud voient leur écotone changer : on assiste à plus de rassemblement en adrets, ce qui permet un maintien de conditions humides favorables à travers la mise en place de boucles de rétroaction positives. Treml (2015) a utilisé des photographies aériennes des Sudètes afin de montrer que la forêt progresse en altitude partout sauf sur les versants nord. Par ailleurs, ils ont constaté que les parties basses de la forêt se densifient. En revanche, en altitude, la forêt a progressé mais avec des arbres dispersés et petits. Pour Leonelli (2016), l'orientation a influencé la couverture neigeuse et la température du sol.

Autre facteur ayant un rôle à jouer sur la *treeline* : la courbure. L'influence de la courbure montre que la forêt se développe mieux dans les formes concaves (Mihaila, 2021). L'humidité y étant plus importante, ces espaces sont mieux protégés du vent. La microtopographie a elle aussi un rôle à jouer en créant par exemple des abris par l'intermédiaire de blocs rocheux (Figure 6) qui créent des conditions favorables à l'implantation de l'arbre (Resler, 2006).



Figure 6 - Etablissement d'un conifère sous la protection d'un abri rocheux (Resler, 2006)

### Conclusion de la partie I

Ainsi, nous avons vu que la *treeline* est une zone qui se situe entre l'étage subalpin et l'étage alpin. Nous avons également vu que l'évolution de la *treeline* peut s'expliquer par un ensemble d'indicateurs climatiques et topo-géomorphologiques.

Case (2014) montre que la variabilité de la *treeline* dépend fortement de l'échelle d'analyse. Il classe différents facteurs explicatifs et dresse une typologie avec trois types de grands indicateurs qui agissent de manière différente en fonction de l'échelle d'observation : (i) la chaleur et le niveau d'ensoleillement, (ii) les facteurs physiologiques de stress : vents forts, propriétés physiques du sol ou humidité insuffisante et (iii) les perturbations : glissements de terrain, feux, tempêtes, avalanches.

Enfin, notre recherche portera principalement sur les facteurs topographiques et géomorphologiques. Les liens entre la topographie à l'échelle locale et le développement de la *treeline* sont complexes. Par l'usage des SIG, nous tenterons de mettre en lumière les facteurs topographiques et géomorphologiques les plus importants, d'en détailler leurs caractéristiques et les liens qu'ils entretiennent entre eux et avec la dynamique de la *treeline*.

## Partie II – Méthodologie : Caractérisation des facteurs topo-géomorphologiques pour une meilleure compréhension de la dynamique de la *treeline* pyrénéenne

Afin de mieux comprendre la dynamique de la *treeline* pyrénéenne associée aux facteurs topographiques, nous proposons une méthodologie permettant de quantifier une partie des caractéristiques topographiques au niveau de la *treeline*. Nous nous plaçons à une échelle locale, sur la base du MNT provenant du référentiel à grande échelle (RGE) à la résolution d'un mètre de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN-F ; <https://www.ign.fr/>). Nous avons utilisé des images issues des bases de données de l'IGN-F et des travaux de la thèse en préparation depuis 2020 de Déborah Birre. Nous avons d'abord isolé les espaces colonisés par la forêt subalpine depuis plus de 60 ans, plus précisément entre 1953 et 2016. Ensuite, nous avons calculé, *via* le logiciel SIG QGIS (<https://www.qgis.org/fr/site/>), un ensemble d'indicateurs morphométriques à partir du MNT afin de décrire les conditions topographiques favorables ou défavorables au développement de la *treeline*. Enfin, nous avons mis en évidence certaines formes du paysage qui nous semblaient pertinentes pour expliquer le processus de colonisation. Ces structures sont identifiées à l'aide de l'algorithme *Geomorphons*, pour *geomorphologic phonotypes*, une méthode qui identifie les formes du paysage en utilisant un schéma de reconnaissance développé par Jasiewicz et Stepinski (2012).

### A - Contexte géographique

#### 1 – Le massif pyrénéen oriental

Le massif pyrénéen s'étend sur cinq départements français : Pyrénées-Orientales (66), Ariège (09), Haute-Garonne (31), Hautes-Pyrénées (65), Pyrénées-Atlantiques (64). L'étude porte sur la partie orientale du massif des Pyrénées. Dans le cadre de ce travail, nous étudions la partie orientale des Pyrénées françaises constituée des départements de l'Ariège (09) et des Pyrénées-Orientales (66) (Figure 7). Ce choix nous permet d'étudier l'évolution et la dynamique de la *treeline* pyrénéenne en lien avec le changement climatique et l'évolution des pratiques agro-sylvo-pastorales.

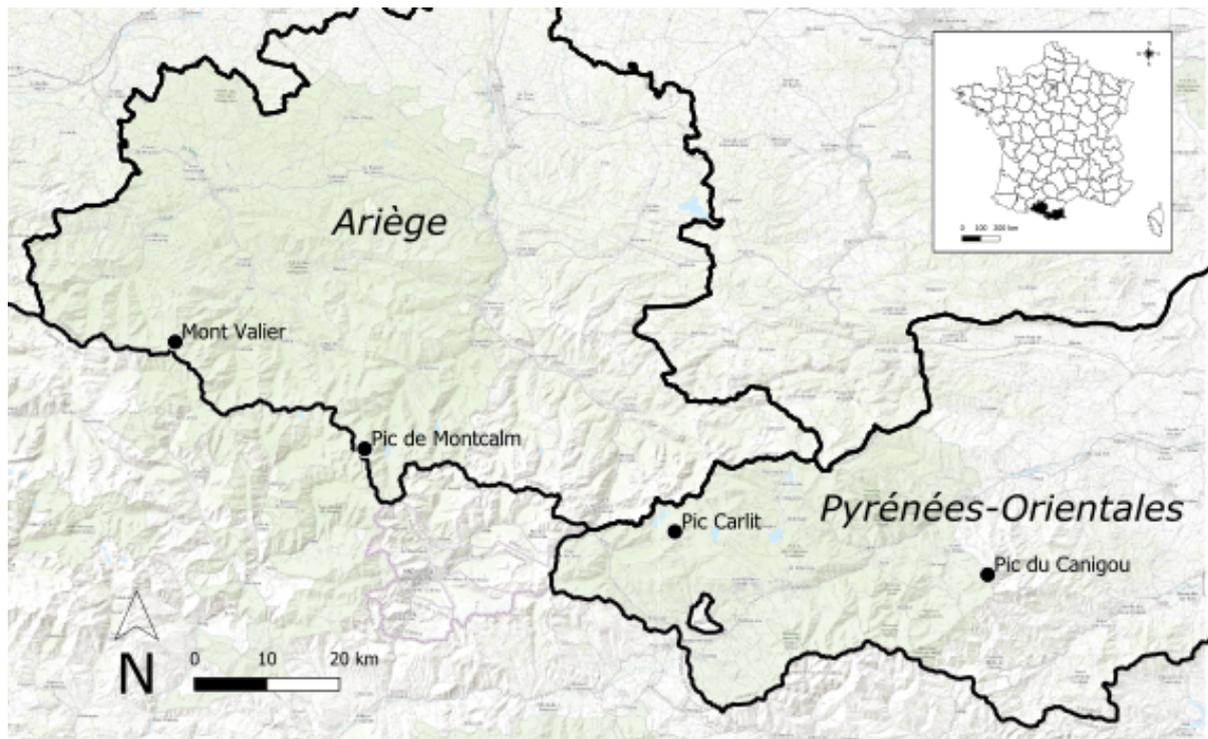


Figure 7 - Carte de localisation du terrain d'étude situés dans les Pyrénées orientales : département de l'Ariège (09) et des Pyrénées-Orientales (66)

## 2 – La *treeline* pyrénéenne et les pins à crochets

La *treeline* pyrénéenne est principalement composée de conifères au sein de laquelle le pin à crochets (*Pinus uncinata* Ramond ex. DC) domine largement dans la partie la plus orientale du massif (Figure 8). Dans les Pyrénées, on le retrouve principalement à l'étage subalpin, entre 1 800 et 2 200 mètres d'altitude. Le pin à crochets est une espèce héliophile qui peut pousser sur des pentes abruptes, des falaises et des éboulis. Sa taille adulte varie entre 10 à 25 mètres (ONF).



Figure 8 - Pin à crochets (*Pinus uncinata*), massif du Puigmal, 2150 m. Photographie : T. Feuillet (2021)

## B – Caractérisation de la dynamique de la *treeline* et analyse topo-géomorphologique

L'usage de la géomatique est en nette augmentation depuis les années 2000. L'observation de la Terre et les informations spatiales de plus en plus précises permettent de comprendre l'organisation des espaces et d'étudier les limites des écosystèmes (Rammig *et al.*, 2006 ; Wallentin *et al.*, 2008). Les satellites de haute résolution sont des outils puissants qui permettent notamment une étude poussée de l'objet qui nous intéresse ici (la *treeline*) (Chhetri, 2019). Les SIG permettent d'étudier la dynamique spatiale de la *treeline*. Ainsi, l'utilisation de ces outils permettent d'étudier les avalanches (Walsh *et al.*, 1994 ; Guo *et al.*, 2014, Masseroli, 2016), l'orientation et la pente (Guo *et al.*, 2014 ; Chhetri *et al.*, 2017), des variables topoclimatiques (Case et Buckley, 2015), le taux d'ensoleillement et l'humidité (Astudillo, 2019) qui constituent chacun des facteurs potentiels modulant la dynamique de la *treeline*. Pour Brenning (2008), les SIG facilitent la manipulation de données spatialisées, l'interrogation de bases de données conséquentes, la visualisation et la cartographie de phénomènes complexes. Dans cette partie, nous

présenterons les différentes ressources et méthodologies que nous avons mises en place et qui nous permettent de mieux comprendre la mobilité de la *treeline*.

## 1 - Jeux de données mis à disposition au début du stage

### a - Localisation de la *treeline* par un fichier vecteur composé de 656 parcelles

La digitalisation de la *treeline* a été opérée par Déborah Birre (Birre, thèse en cours de préparation). Au niveau de la *treeline*, des rectangles de 600 mètres sur 200 mètres ont été disposés perpendiculairement à la pente principale (Figure 9).

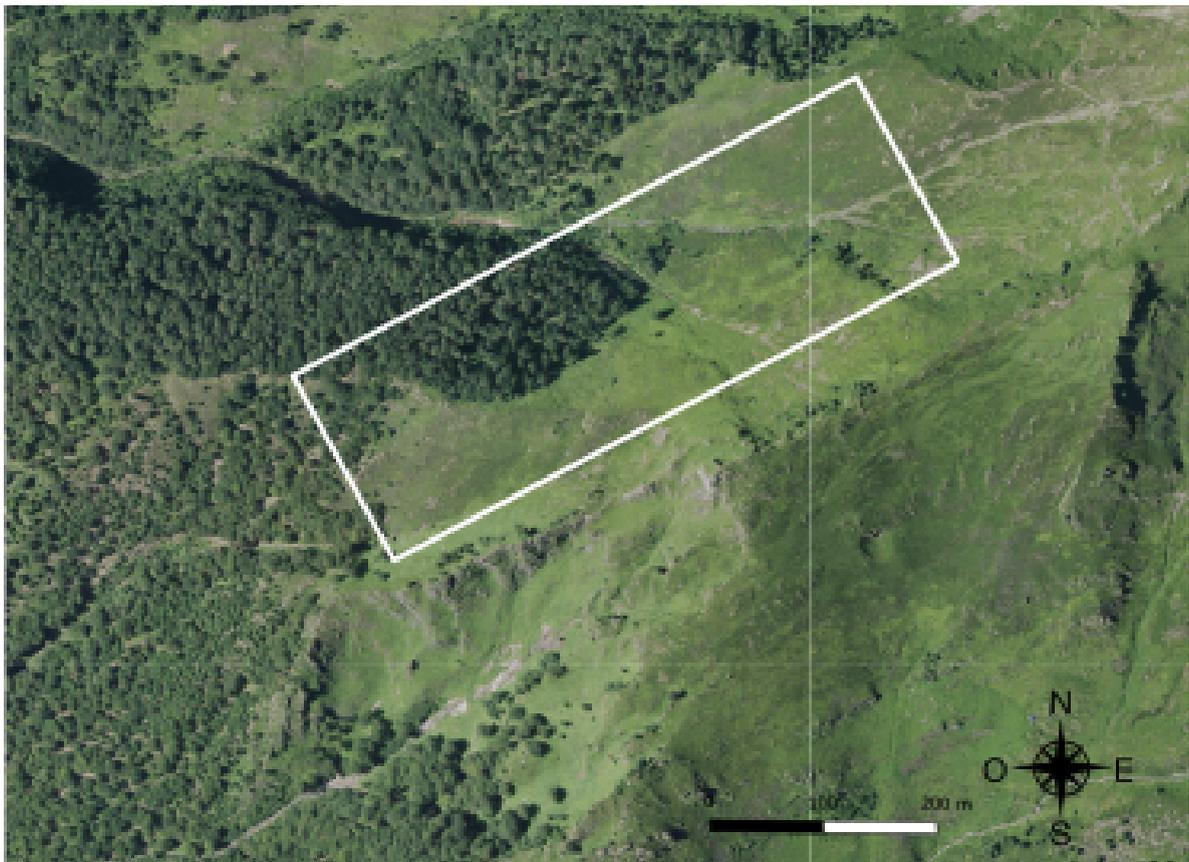


Figure 9 – Rectangle de 600 par 200 mètres. Parcelle 408 (secteur mont Valier). Source : Fond de carte ESRI

Le jeu de données final utilisé dans le cadre de ce mémoire comporte 656 parcelles (Figure 10). Le travail d'analyse et de caractérisation se fait au sein de ces parcelles.

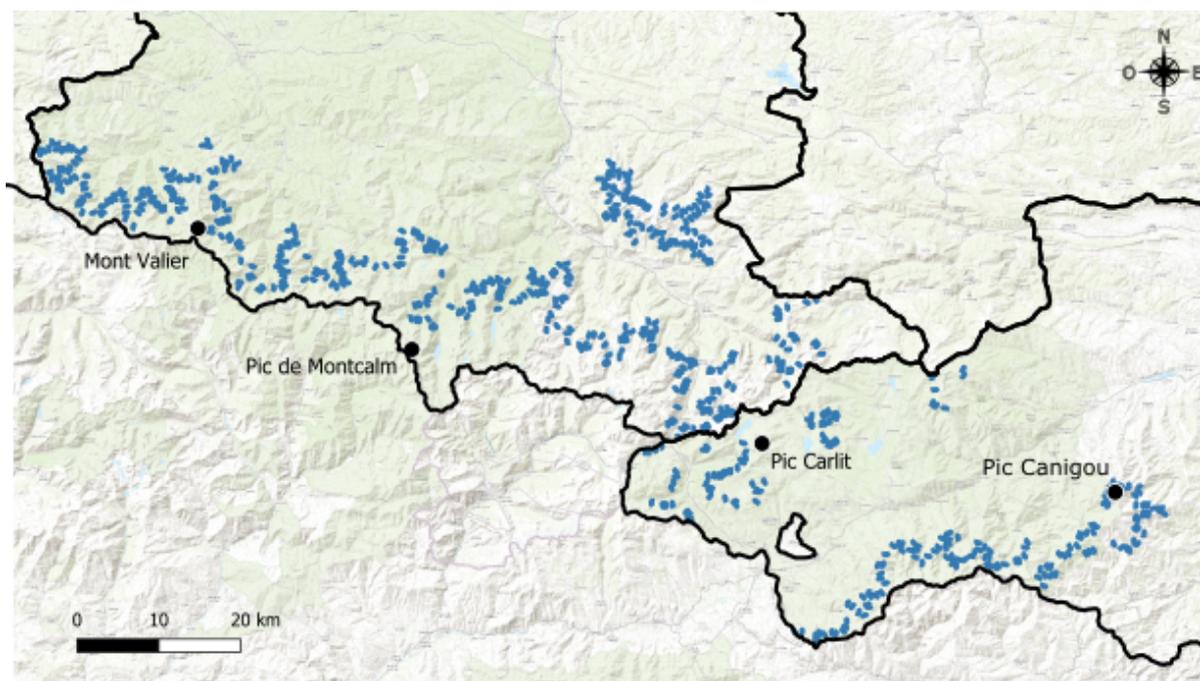


Figure 10 – Périmètre d'étude et l'ensemble des 656 parcelles identifiées (en bleu)

#### b - Etude de la dynamique à partir de fichiers rasters

La *treeline* a été digitalisée à partir d'orthophotographies historiques (1953 pour l'Ariège, 1956 pour les Pyrénées-Orientales) et actuelles (2016 pour l'Ariège, 2015 pour les Pyrénées-Orientales) disponibles sur le site de l'IGN-F (Figure 11). A partir de cette digitalisation des rasters binaires classifiés (pixels de valeur 0 : non forêt, 1 : forêt pour chaque année) ont été construits et mis à notre disposition. Nous travaillons à partir de ces deux rasters.

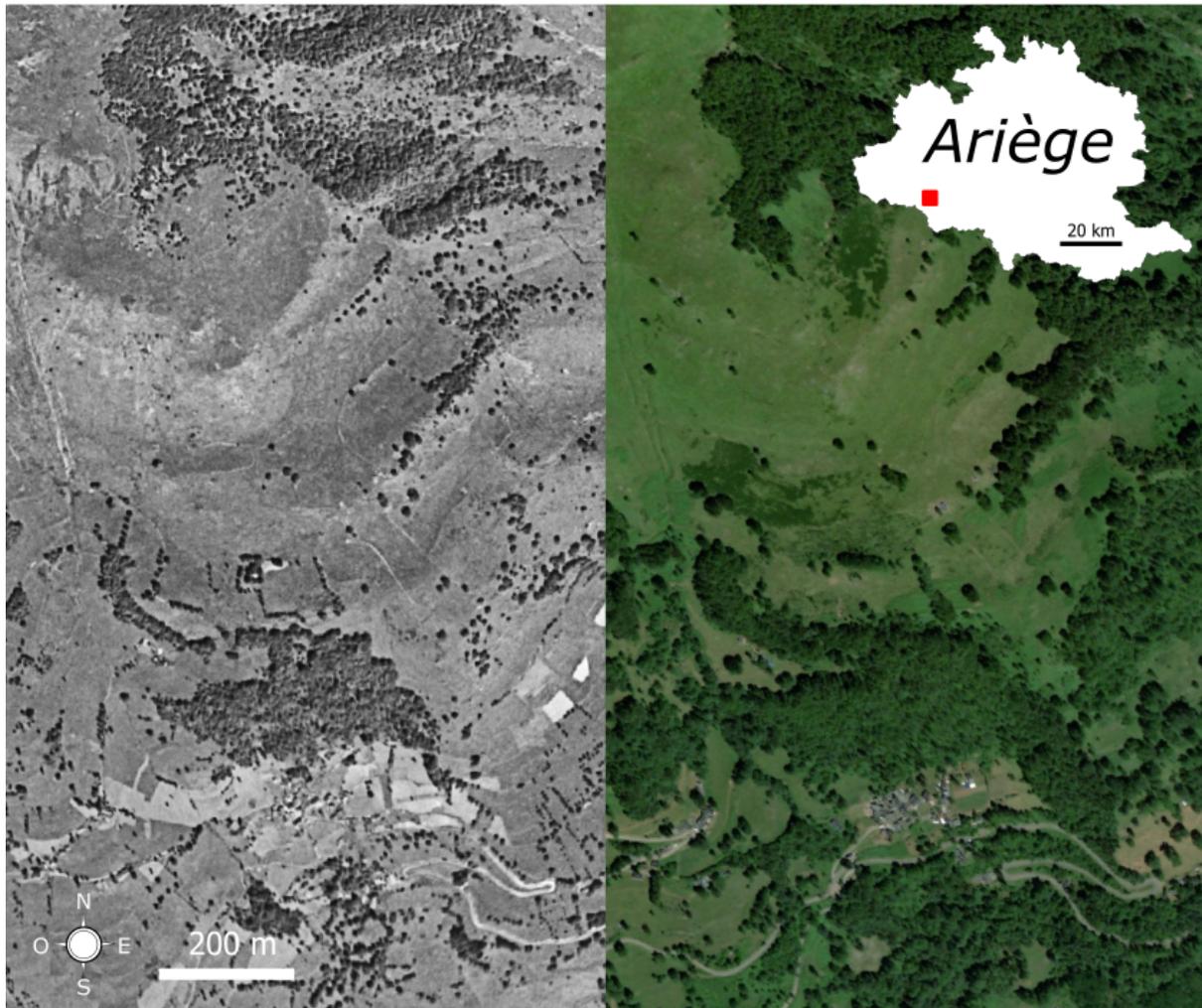


Figure 11 - Orthophotographie historique, 1953 (à gauche) et orthophotographie actuelle, 2016 (à droite). Coordonnées de l'orthophotographie (carré rouge) : 550600, 6189900 (code EPSG:2154)

## 2 – Etape 1 : Caractérisation de la dynamique par analyse diachronique

En utilisant le logiciel QGIS et le langage de programmation R 4.1.2 (R Core Team, 2022) et à partir de rasters binaires classifiés (pixels de valeur 0 : non forêt, 1 : forêt pour chaque année), les pixels forestiers du raster de 2015 ont d'abord été reclassés avec la valeur 10 (Tableau 1), le pixel de valeur 1 devenant un pixel de valeur 10.

Tableau 1 - Valeurs des pixels des rasters binaires reclassifiés en 1950 et en 2010

	1950	2010
Valeur pixel non forêt	0	0
Valeur pixel forêt	1	10

Ensuite, les rasters de 1950 et 2010 ont été additionnés *via* la *calculatrice raster* de QGIS afin de distinguer différentes classes de pixels. Pour chaque parcelle, nous obtenons alors un nouveau raster constitué de pixels avec quatre classes.

- la valeur 0 indique un maintien de sol nu (non forêt),
- la valeur 1 indique une dynamique de décolonisation,
- la valeur 10 indique une dynamique de colonisation,
- la valeur 11 indique un maintien des espaces de forêt (Tableau 2).

Tableau 2 - Méthodologie proposée pour l'analyse de la dynamique forestière

Occupation du sol en 1950	Occupation du sol en 2010	Evolution de l'occupation
Non forêt : 0	Non forêt : 0	Maintien sol nu : 0
Forêt : 1	Non forêt : 0	Décolonisation : 1
Non forêt : 0	Forêt : 10	Colonisation : 10
Forêt : 1	Non forêt : 10	Maintien forêt : 11

Ce nouveau raster permet de distinguer les pixels non colonisés, décolonisés, colonisés ou maintenus en espace forestier et sera la base des analyses développées ci-après (Figure 12).

Ainsi, pour chaque parcelle, nous obtenons un pourcentage de pixels colonisés obtenu est faisant le ratio entre les pixels colonisés et le total des pixels de chaque parcelle. Par exemple, la parcelle 693 dispose de 480 000 pixels classifiés. Parmi ces 480 000 pixels, 27 685 pixels sont classés comme étant des pixels de "colonisation" (associés à la valeur 10), et représentent donc 23,1% de la parcelle.

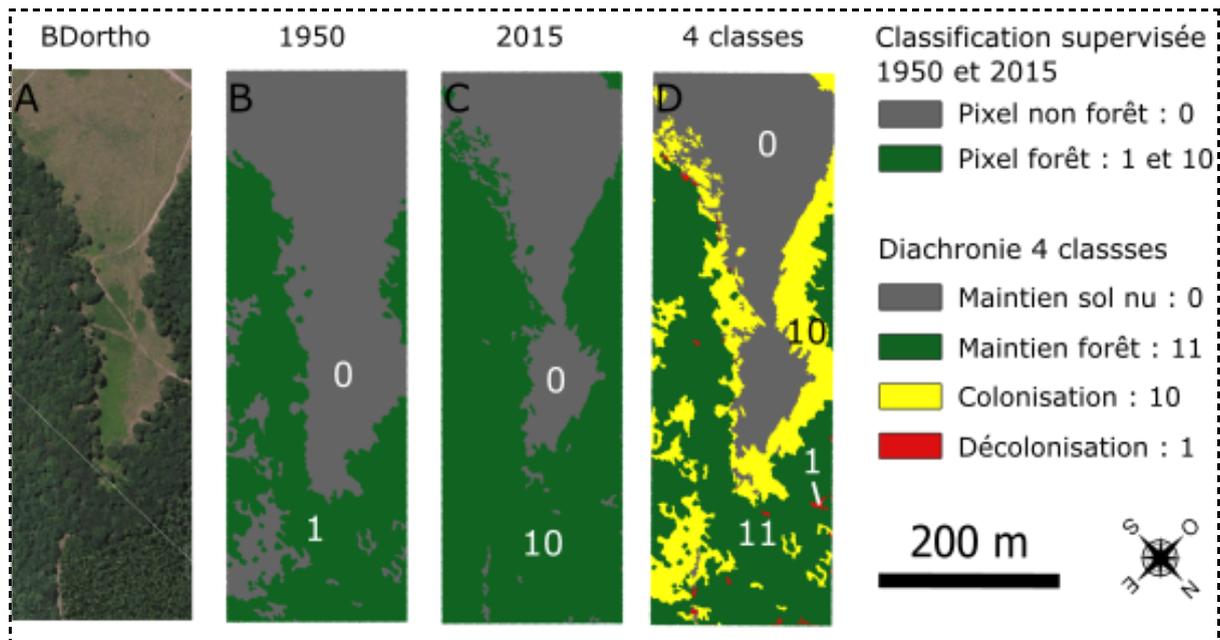


Figure 12 - Analyse diachronique de la parcelle 693. A : Orthophotographie actuelle (2016) ; B : Raster historique : classification pixel forêt / pixel non forêt en 1955 ; C : Raster actuel reclassifié : classification pixel forêt / pixel non forêt en 2015 ; D : Nouveau raster résultant de la somme du raster B et du raster C : Diachronie avec 4 classes présentant la dynamique forestière.

### 3 – Etape 2 : 11 indicateurs pour l’analyse de la topographie

#### a - Le MNT RGE ALTI® 1m, base des indicateurs topo-géomorphologiques

Nous disposons du MNT à haute résolution (1 mètre) issu du RGE-ALTI (IGN-F; Figure 13) daté de 2008 pour l’Ariège et de 2012 pour les Pyrénées-Orientales. Un MNT est une représentation numérique et mathématique de l’altitude d’un point quelconque de la surface terrestre d’une zone géographique, dans un système référentiel bien défini (Miller et Laflamme, 1958). Ce raster d’altitude a été découpé selon l’emprise des 656 parcelles correspondant aux parcelles situées aux limites de la *treeline*.

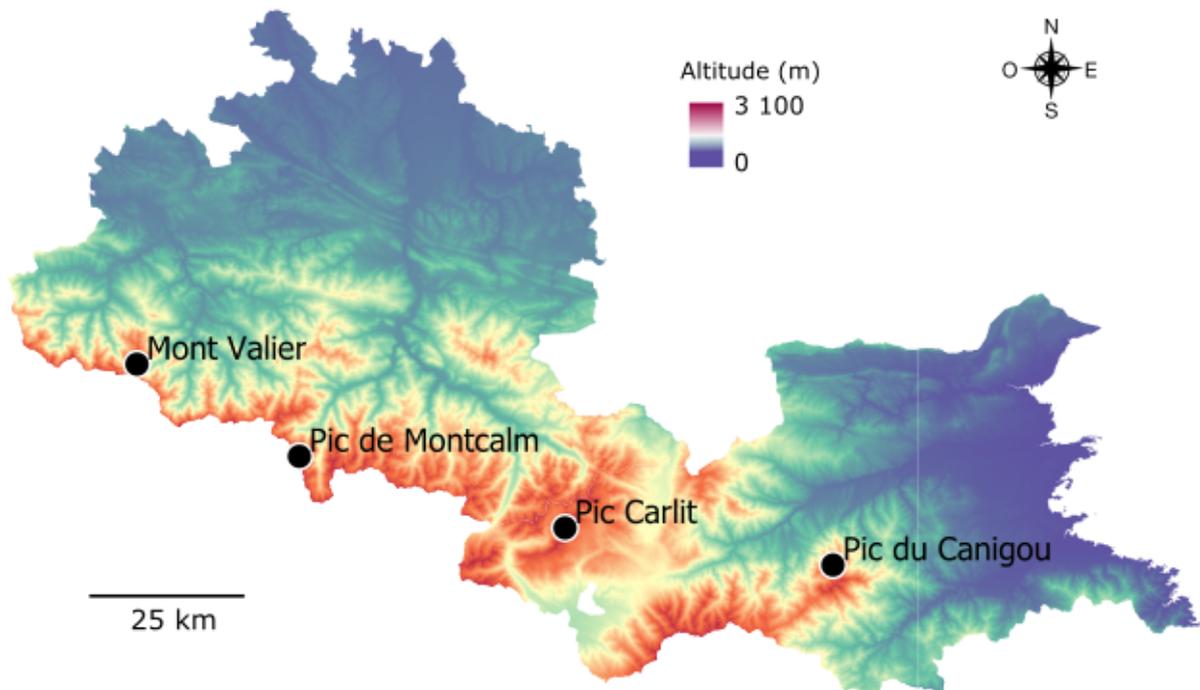


Figure 13 - Modèle numérique de terrain des départements de l'Ariège et des Pyrénées-Orientales – RGE ALTI® 1m

#### b – Traitements basés sur la topographie

Le MNT 1m nous permet de calculer une série d'indices : l'altitude moyenne (en mètres) permettant, en théorie, de trouver un seuil limitant la croissance de la végétation (Körner, 2012), la pente moyenne (en degrés) indiquant l'intensité des processus gravitaires (Feuillet, 2020) et l'orientation moyenne de chaque parcelle indiquant des processus gravitaires plus ou moins important ou des niveaux d'ensoleillement différents (Holtmeier, 2003). Afin de mieux comprendre l'influence de la topographie sur la *treeline*, nous calculons également d'autres indicateurs : l'indice de position morphométrique (*morphometric position index* : *MPI*), l'indice de position topographique (*topographic position index* : *TPI*), l'indice de rugosité topographique (*topographic ruggedness index* : *TRI*), l'indice d'humidité topographique (*topographic wetness index* : *TWI*), la profondeur de la vallée (*valley depth*) et l'indice d'exposition au vent (*wind exposition index* : *WEI*). Ces indicateurs sont des proxies servant à caractériser le niveau de protection d'une surface, mais aussi à déterminer le niveau potentiel de l'humidité des sols, l'intensité de l'activité géomorphologique ou bien encore le niveau de ciel visible au sein des paysages forestiers de chaque parcelle (tableau 3). Ils sont calculés à partir du langage R *via* le package *qgisprocess* (<https://github.com/paleolimbot/qgisprocess>). Les données obtenues sont une moyenne de chaque indicateur pour chacune des 656 parcelles.

- Indice de position morphométrique (MPI)

Cet indicateur caractérise l'environnement de chaque pixel en évaluant le niveau de protection du relief. Il permet de distinguer le degré d'ouverture du paysage. Cet indicateur nous permet d'évaluer la façon dont le relief environnant protège chaque cellule (Yokoyama, Shirasawa, et Pike, 2002).

- Indice de position topographique (TPI)

Cet indicateur est calculé à partir de la différence entre l'altitude d'une cellule et la moyenne des cellules adjacentes (Weiss, 2001). Il permet d'indiquer les cellules en position d'abris, qui sont ainsi protégées du vent et permettent aux graines de s'installer (Resler, 2006, Butler *et al.* 2007 ; Holtmeier and Broll 2011, Astudillo, 2019). Plus l'indice est élevé, plus l'espace est convexe (par exemple dans le cas d'une crête).

- Indice de rugosité topographique (TRI)

L'indice de rugosité topographique nous indique la somme des différences d'altitude entre chaque cellule. Le TRI permet d'explorer la rugosité du terrain, c'est-à-dire les conditions de surface qui jouent un rôle dans le déclenchement d'événements gravitaires (avalanches, éboulements, chutes de pierre) influençant directement la *treeline* (Brožová, 2021).

- Indice topographique d'humidité (TWI)

Le *Topographic Wetness Index* (TWI) est un indice topographique d'humidité développé par Beven et Kirkby (1979). A partir d'un MNT, l'indice est calculé à partir de la pente et de la surface drainée afin d'évaluer les zones où les masses d'eau sont stagnantes et où en conséquence l'humidité du sol est potentiellement plus élevée. Il est un bon indicateur d'humidité des sols (Kopecky *et al.*, 2021). Le TWI se calcule selon l'équation :

$TWI = \ln(A / \tan(\beta))$ , où A est l'aire contributive spécifique ( $m^2$ ) et  $\tan(\beta)$  est l'angle ( $\beta$ ) en radians de la pente le long de la direction de flux.

- Profondeur de vallée (valley depth)

La profondeur de vallée est obtenue en faisant la différence entre l'altitude d'un pixel représentant un point bas et l'altitude d'un pixel d'un point haut défini en fonction d'un certain seuil. Les points hauts (*ridge level*) sont calculés en utilisant les ordres de Strahler (1952). La profondeur de vallée traduit l'intensité des dynamiques morphologiques (Feuillet *et al.*, 2020). Ces processus géomorphologiques (mouvements de masse, éboulements, chutes de pierres) contrôlent l'altitude de la position de la *treeline*. Le contrôle se fait par une limitation de la progression de la *treeline* vers le haut (Wardle, 2008 ; Masseroli, 2016).

- Indice d'exposition au vent (WEI)

L'indice d'exposition au vent exprime le degré d'ouverture d'un lieu au vent, en prenant en compte la pente et la direction présumée du vent (Böhner et Antonic, 2009). Le vent joue un rôle important dans la dynamique de la *treeline* (Körner, 2003 ; Malanson, 2004 ; Harsch et Bader, 2011 ; Holtmeier et Broll, 2018). Il participe à la forme que peuvent prendre les arbres (*krummholtz-type* si le vent est fort). Il participe aussi à la dispersion des graines (Dearborn et Danby, 2017). Plus l'indice est élevé, plus l'espace est exposé au vent.

c – Traitements basés sur la visibilité : Sky view factor et visible sky

Le facteur de vue du ciel (*sky view factor*) est dérivé de l'indice de ciel visible (*visible sky*). Ils mesurent la portion de ciel visible. Ces indicateurs donnent une idée du niveau d'ensoleillement de chaque parcelle et permettent de saisir la situation de la parcelle : crête ou dépression, autrement dit si nous avons affaire à une surface concave ou convexe (Monna, 2018). Plus l'indicateur est élevé, plus la surface est ouverte sur le ciel.

Le tableau 3 indique les valeurs que peuvent prendre l'ensemble des 11 indicateurs présentés ci-dessus. Il présente également les facteurs mesurés et leurs potentiels impacts sur la *treeline*.

Tableau 3 - Récapitulatif des variables topographiques

Variables	Minimum	Maximum	Facteurs mesurés	Impact potentiel sur la <i>treeline</i>
Altitude (m)	0	$+\infty$	Altitude	Seuil de croissance de la végétation
Pente (degré)	0	90	Inclinaison d'une surface. Plus l'angle est grand plus la pente est forte	Mesure de l'intensité potentielle des dynamiques géomorphologiques
Orientation (degré)	0	360°	Orientation. 0/360 = Nord, 90 = Est, 180 = Sud, 270 = Ouest	Mesure de la radiation solaire
<i>Morphometric protection index</i>	0	1	Proche de 0 : espace ouvert. Proche de 1 : espace protégé	Mesure de l'intensité potentielle des dynamiques géomorphologiques
<i>Topographic position index</i>	$-\infty$	$+\infty$	Valeur positive : convexité. Valeur négative : concavité, Valeur proche de zéro : planéité	Indicateur d'abris : espace concave : espace protecteur
<i>Topographic ruggedness index</i>	0	$+\infty$	Faible valeur : faible rugosité. Forte valeur : forte rugosité.	Mesure de l'intensité potentielle des dynamiques géomorphologiques
<i>Topographic wetness index</i>	0	1	Valeur proche de 0 : faible humidité Valeur proche de 1 : forte humidité	Mesure de l'humidité du sol. Espace humide : espace favorable
<i>Valley depth</i>	0	$+\infty$	Valeur faible : vallée peu profonde Valeur élevée : vallée profonde	Mesure de l'intensité des dynamiques géomorphologiques
<i>Wind exposition index</i>	0	2	Proche de 0 : faible exposition au vent. Proche de 2 : forte exposition au vent	Indicateur d'abris : faible exposition : espace favorable
<i>Visible sky / Sky view factor</i>	0	100	Valeur forte : grande surface de ciel Valeur proche de zéro : faible surface de ciel	Mesure de la radiation solaire

#### 4 – Etape 3 : *Geomorphons* pour l'analyse des formes du terrain

##### a - Les formes étudiées : ravines et les talwegs

L'étude porte également sur des formes spécifiques du relief liées aux processus d'érosion : les ravines et les cours d'eau (Figure 14) observés dans le réseau des 656 parcelles identifiées dans les Pyrénées. Ces objets sont créés par

des mécanismes d'érosion. Ils sont constitués de réseaux de talwegs, le talweg étant défini comme une ligne joignant les points les plus bas d'un vallon ou d'une vallée. Plusieurs classifications existent dans la littérature, mais aucune ne s'est réellement imposée.

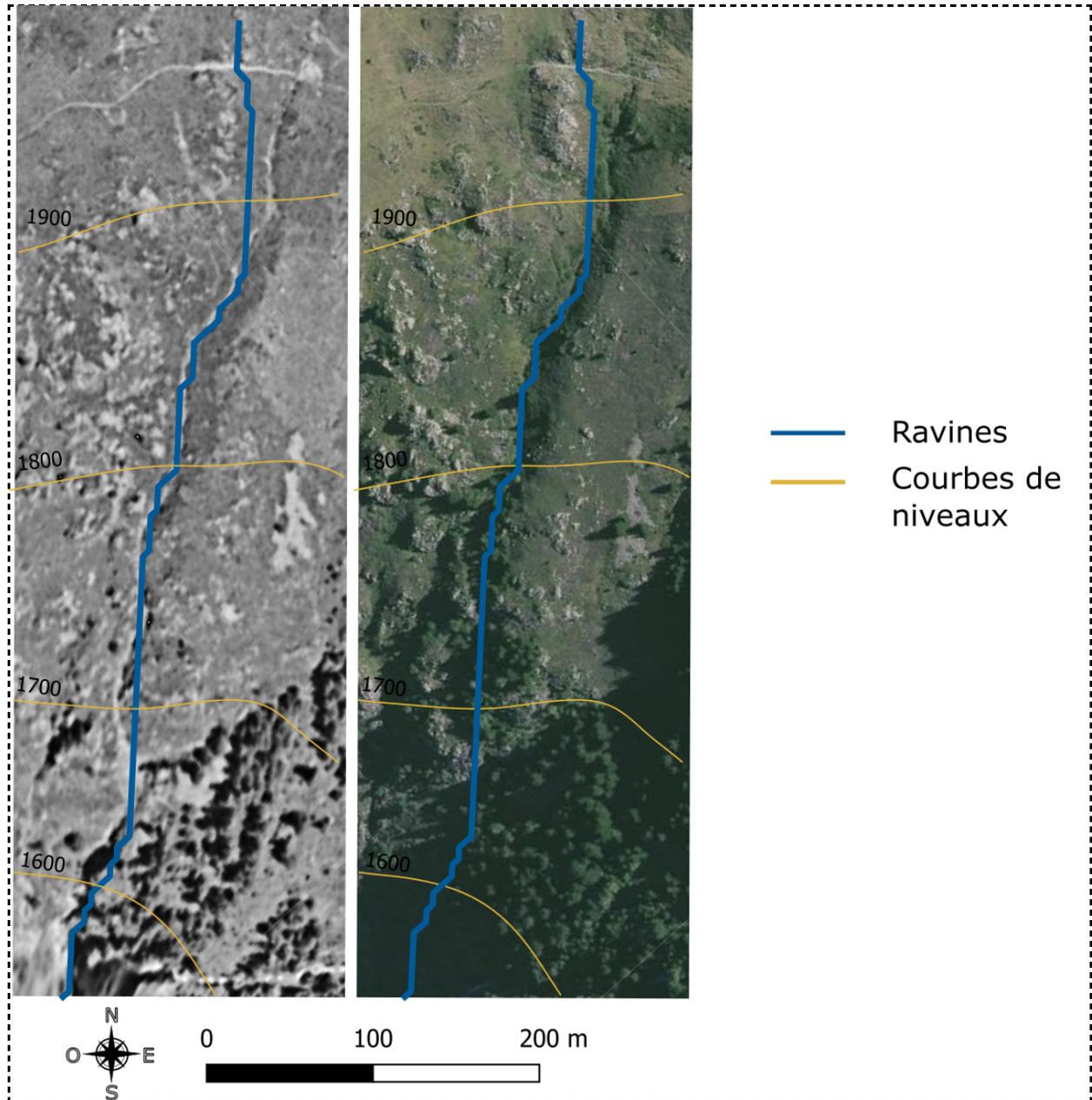


Figure 14 – Exemple de ravine située dans la parcelle 252 (541124,3 ; 6193703.9. Code EPSG:2154)

Tout d'abord, une ravine (*gully* en anglais) est une forme d'incision élémentaire avec un escarpement minimum supérieur à 50 cm. Sa création et son développement dépendent du niveau d'érodabilité de ses sols. Au sein de la ravine, les processus d'érosion sont dominés par des mouvements de masse et les pentes

sont en moyenne de 30° (Thwaites, 2021). Une ravine trouve son origine dans l'érosion de sa partie supérieure qui s'érode, augmentant sa taille vers l'amont (Goudie, 2004). Un cours d'eau (*stream channel* en anglais) incise le relief, crée un lit rocheux et dégage des berges plus ou moins raides. Au sein d'un cours d'eau se déroulent des processus et des dynamiques hydrologiques mais contrairement à la ravine, le cours d'eau n'a pas de partie supérieure soumise à une forte érosion.

Pour Masseroli (2016), il est parfois difficile de distinguer ces deux formes. Elle propose d'étudier ces objets à travers trois processus qui engendrent leur formation : (i) des processus liés aux mouvements hydrologiques (pluie), (ii) des processus liés aux mouvements gravitationnels (mouvements de masse : chutes de pierres, mouvements de terrain, chutes de débris) dans le cas de ravine ou bien (iii) des processus liés aux mouvements de glace et de neige (avalanche). Aussi, Puech (2009) indique une typologie possible des objets concaves en fonction de l'échelle de caractérisation (Tableau 4).

*Tableau 4 - Typologie des formes et des modèles d'incision selon leur taille et MNT permettant de les appréhender (Puech, 2009). A partir d'un MNT à une résolution de 1 mètre, nous pouvons détecter des "ravines" d'une largeur in situ allant de 10 mètres à quelques centaines de mètres.*

Types d'objets linéaires	Largeur <i>in situ</i>	Taille maximale du pixel MNT	Type de MNT pour une détection possible
<b>Vallée</b>	1 km à qq km	100 à 200 m	MNT génériques
<b>Ravin – vallon</b>	100 m à qq hm	10 à 20 m	SPOT 20 m
<b>Ravine</b>	10 m à qq dam	1 à 2 m	Photo aérienne, LiDAR aéroporté
<b>Ravine élémentaire</b>	1 m à qq m	10 à 20 cm	Photo drone, ULM, LiDAR terrestre
<b>Rigole</b>	10 cm à qq dm	1 à 10 cm	Photo drone, ULM, LiDAR terrestre
<b>Griffures</b>	< 10 cm	1 à 2 cm	LiDAR terrestre

#### b - L'algorithme *Geomorphons*

Au sein des 656 parcelles, nous avons cherché à identifier des formes composées de talwegs et de vallons, de dépressions et micro-dépressions, afin d'identifier des zones humides propices au développement de la végétation et des espaces pouvant offrir des abris à la végétation. Selon certains auteurs, ces zones concaves sont propices à la hausse de la timberline (Holtmeier, 2005 ; Resler, 2005 ;

Batllori, 2009 ; McIntire, 2016 ; Cudlin, 2017 ; Mihaila, 2021) car elles protègent du vent et concentrent l'humidité.

Afin de tester les hypothèses de recherche, nous utilisons l'algorithme *Geomorphons* disponible dans l'application SAGA (Système pour les Analyses Géoscientifiques Automatisées). *Geomorphons*, pour *geomorphologic phonotypes*, est une méthode qui identifie les formes du paysage en utilisant un schéma de reconnaissance développé par Jasiewicz et Stepinski (2012). Les géomorphons sont déterminés par une méthode de classification semi-automatique du MNT. Cette méthode ne prend pas en compte les valeurs des cellules voisines mais s'inspire du principe de ligne de mire. La méthode est flexible et s'adapte à différents terrains car le critère de la "ligne de mire" est plus souple que le critère de la "fenêtre fixe" que l'on trouve dans les autres méthodes de classification. Elle adapte la distance à prendre en compte selon la notion de « *terrain openness* ». Il s'agit de calculer le rapport entre ce qui est appelé l'angle au zénith ( $\Phi$  : *zenith angle*) et l'angle au nadir ( $\Psi$  : *nadir angle*) (Figure 15) au sein d'un rayon de recherche défini par l'utilisateur (*lookup distance*). Le rayon est égal à x fois la largeur d'un pixel. Par exemple, choisir une *lookup distance* de 10 pour un MNT d'une résolution de 5 mètres cela revient à choisir une *lookup distance* de 50 mètres. Aussi, les paramètres "*threshold angle*" et "*multi scale factor*" permettent respectivement de définir le niveau minimum de planéité souhaité et de régler un seuil maximum de recherche. Nous garderons les valeurs par défaut pour ces deux paramètres et nous ferons varier la *lookup distance* afin de trouver la meilleure représentation possible.

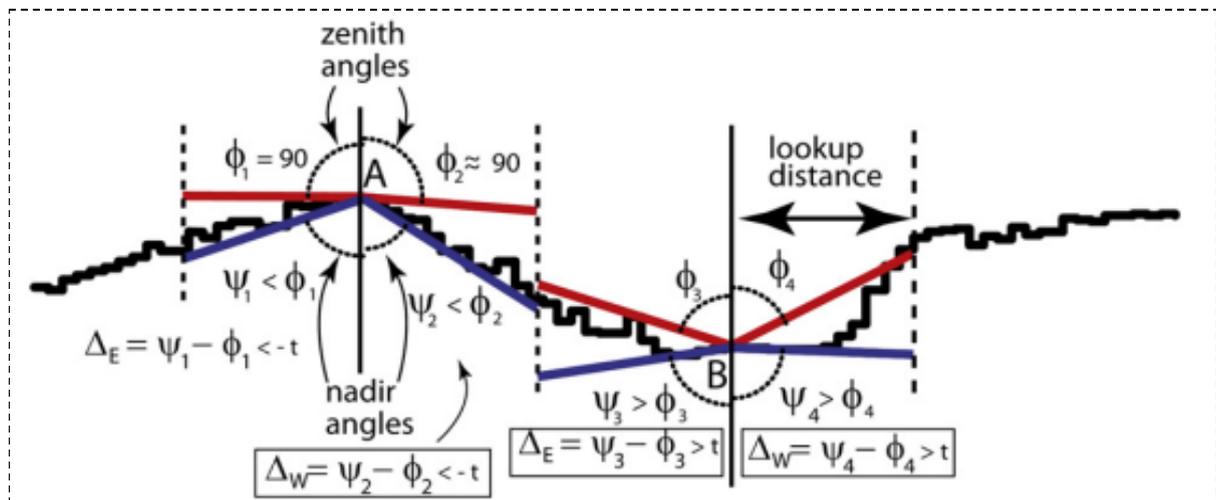


Figure 15 - Geomorphons utilise des concepts de ligne de visée appliqués à l'identification des formes de relief. Il compare la position d'une cellule avec ses voisines en indiquant si elles se situent plus haut, à égale altitude ou plus bas en comparant les mesures d'angles au nadir et au zénith (Jasiewicz et Stepinski, 2012)

Chaque cellule du MNT est donc comparée aux huit valeurs des voisins visibles les plus lointains. Les altitudes équivalentes à la valeur de la cellule centrale sont représentées par un point vert, celles plus basses en bleu et celles plus hautes en rouge (Figure 16).

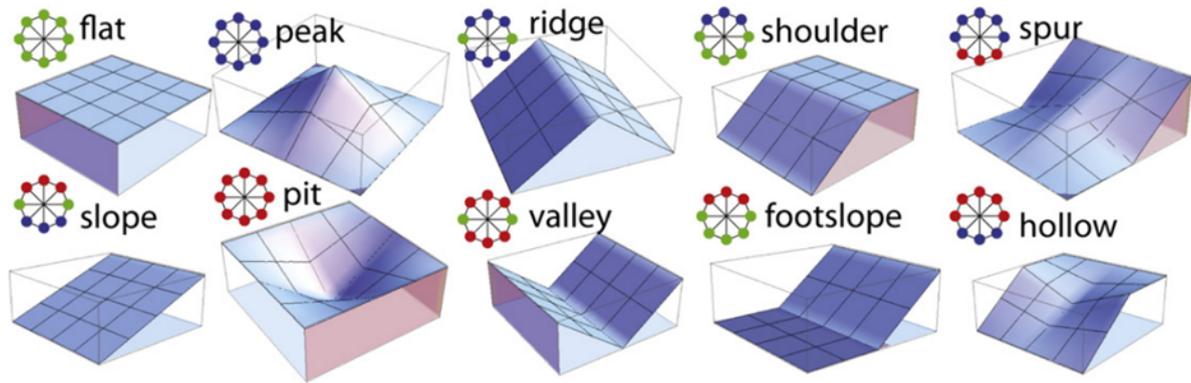


Figure 16 - Schéma de reconnaissance développé par Jasiewicz et Stepinski (2013)

Selon la configuration des huit valeurs, dix formes peuvent être identifiées (Figure 17).

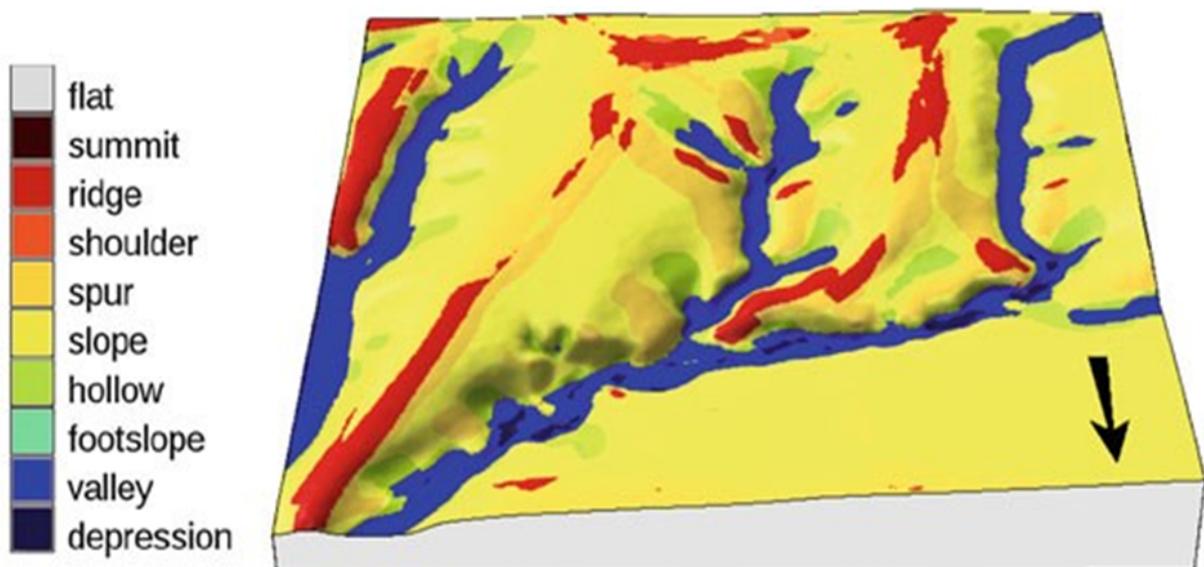


Figure 17 - Identification des formes du paysage : Flat : plat, summit : sommet, ridge : crête, shoulder : haut de versant, spur : éperon, slope : pente, hollow : creux de versant, footslope : bas de versant, valley : vallée, depression : dépression (Jasiewicz et Stepinski, 2013)

L'algorithme des géomorphons permet d'étudier les formes du relief. Les images de très haute résolution sont aujourd'hui en forte croissance et sont disponibles relativement facilement. Nous avons décidé d'utiliser les géomorphons, qui est une méthode relativement récente (2012) comparée aux autres méthodes de classification automatique du relief basées sur la valeur de la pente et de la courbure du terrain (Dikau, 1991 ; Wood, 1996). Ces méthodes sont efficaces pour traiter de petits rasters mais fonctionnent moins bien dans le cadre de rasters à plusieurs millions de pixels : les calculs sont alors trop complexes et demandent trop de ressources pour identifier avec suffisamment de précision l'ensemble des formes du terrain. Un des premiers usages de l'algorithme fut la création de la carte géomorphologique de la Pologne (Jasiewicz and Stepinski, 2013). Il a été aussi utilisé pour décrire le Monténégro (Frankl et al., 2016). Puis l'algorithme a été utilisé pour identifier certaines formes spécifiques du paysage, comme des drumlins (Sarasan *et al.*, 2018) ou des surfaces plates (Veselsky *et al.*, 2015). Bandura (2016) l'a aussi utilisé pour identifier et délimiter des sommets dans les montagnes slovaques. Cette méthode a également été utilisée pour détecter des objets à une échelle plus fine : des formes à la surface d'un glacier (Gawrysiak, 2020), des traces de barrages organisés par des castors (Swift, 2021), ou bien encore la détection de formes fluviales côtières (Gioia, 2021). Mais les géomorphons n'ont encore jamais été utilisés dans le cadre d'une étude sur la *treeline* à travers la caractérisation du géomorphon #7 "creux de versant". Un des principaux intérêts des géomorphons réside dans la détection d'un paramètre optimal (le rayon de recherche) qui fait converger l'ensemble des formes, tout en restant cependant dépendant de la résolution du raster d'entrée. Nous avons testé cinq rayons de recherche différents : 5, 15, 30, 60 et 100.

### c - Validation de la classification

Afin de valider la classification proposée par *Geomorphons*, nous avons positionné 266 points sur des éléments du paysage que nous avons identifiés comme étant des ravines ou des talwegs à partir d'orthophotographies récentes. Nous avons également sélectionné 266 points que nous avons identifiés comme n'étant pas des ravines. Ces sélections nous permettent de construire une matrice de confusion (Figure 18).

		Observé (terrain)		
		Positif	Negatif	
Prédit (classif)	Positif	a	b	a+b
	Negatif	c	d	c+d
		a+c	b+d	N

Figure 18 - Matrice de confusion dans le cadre d'une classification (Sheeren, 2018)

Il existe plusieurs indicateurs qu'il est possible d'extraire d'une matrice de confusion (Sheeren, 2020) et qui nous renseignent sur la qualité de la classification.

(i) La précision globale est un indicateur synthétique global. Il se calcule en divisant la somme des pixels bien classés par la somme totale des pixels. Il indique le nombre d'éléments bien classés.

$$OA = \frac{a + d}{N}$$

avec  $N = a + b + c + d$

(ii) Le MCC (Matthews correlation coefficient) est un indicateur global adapté aux tables de contingence 2x2 (Sheeren, 2020). Il est compris entre -1 et +1. Une valeur proche de +1 indique que la prédiction est bonne. A l'inverse, une valeur proche de -1 indique une mauvaise prédiction.

$$MCC = \frac{(a * d) - (c * b)}{\sqrt{(a + b)(a + c)(d + b)(d + c)}}$$

(iii) La sensibilité ( $S_1$ ) nous indique pour une classe donnée la proportion de vrais positifs, c'est-à-dire la probabilité de prédire une valeur positive quand la valeur est positive. En télédétection, on parle aussi de précision producteur.

$$S_1 = \frac{a}{a + c}$$

(iv) La précision nous indique pour une classe donnée la proportion d'échantillons bien classés parmi les prédits de la classe.

$$Précision = \frac{a}{a + b}$$

## C – Relations statistiques entre les variables topo-géomorphologiques et la variable colonisation

Notre étude porte sur les pixels de colonisation (#10) (Tableau 2). Nous souhaitons expliquer le pourcentage de pixels de la variable “colonisation” (variable dépendante) qui correspond à la proportion du nombre de pixels 10 dans l’ensemble des pixels de chaque parcelle. Nous avons réalisé un test de Shapiro-Wilk pour s’assurer de la normalité de la distribution de cette variable. Aussi, pour chaque parcelle, nous avons calculé la moyenne de chaque variable topographique explicative. Concernant les variables géomorphologiques obtenues *via* le traitement *Geomorphons*, nous avons calculé la proportion du total de chaque géomorphon dans l’ensemble des pixels de chaque parcelle. Ainsi, nous obtenons par exemple la densité du géomorphon #7, “creux de versant”, dans chaque parcelle. Nous avons principalement travaillé avec le langage R et la plateforme RStudio (Figure 19).

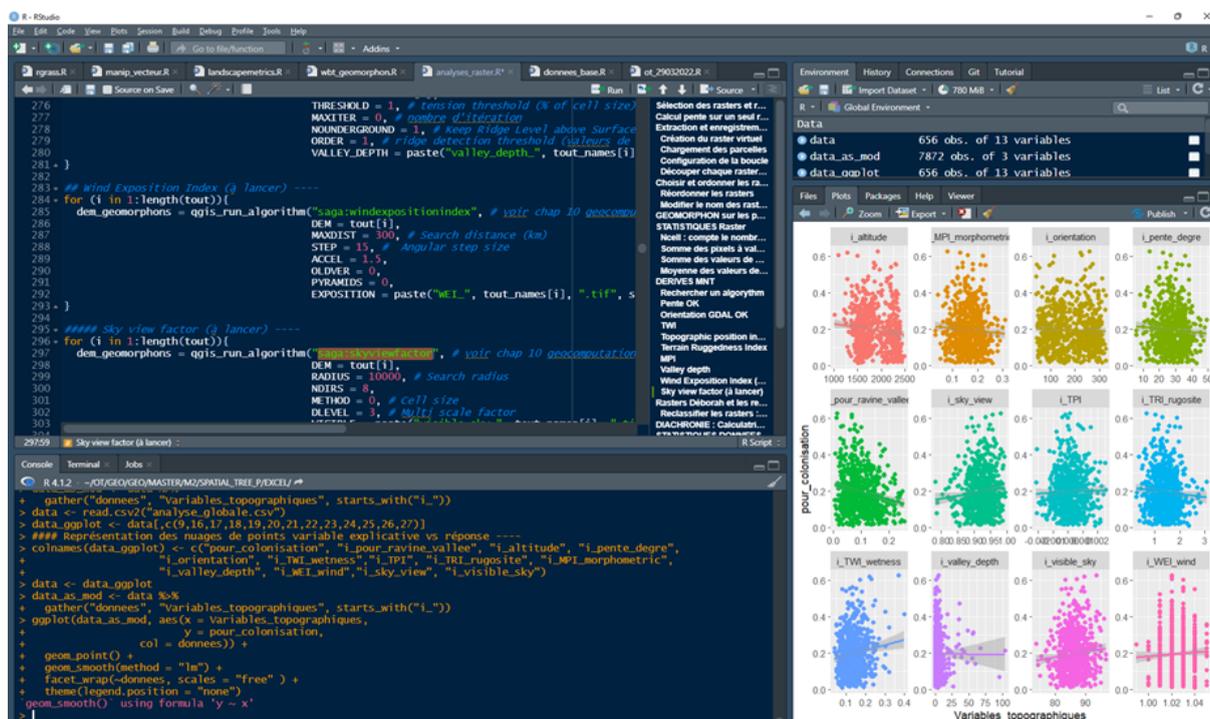


Figure 19 – Interface RStudio “Ghost Orchid” Release 2021.09.2

Afin d’analyser les liens entre les variables topographiques, les variables géomorphologiques et la colonisation, nous avons utilisé un modèle de régression linéaire généralisé. Nous avons centré et réduit toutes les variables du modèle. Dans la mesure où la variable dépendante est comprise entre 0 et 1, une régression bêta a été privilégiée (Ferrari et Cribari-Neto, 2004). Pour ce faire, nous utilisons le package R *betareg* : <https://cran.r-project.org/web/packages/betareg/betareg.pdf>.

## *Conclusion de la partie II*

L'objectif de ce travail est de mieux comprendre la dynamique de la *treeline* pyrénéenne. Pour ce faire, à partir de différentes données rasters et vecteurs, nous avons mis au point une méthode permettant de relier statistiquement des indicateurs d'évolution d'occupation du sol par le couvert forestier depuis 1950 à des indicateurs topo-géomorphologiques. Au sein de 656 parcelles situées entre l'étage subalpin et l'étage alpin, nous avons créé un raster de type diachronique, nous avons calculé des indicateurs topographiques et nous avons utilisé un algorithme nous permettant d'identifier différentes formes du paysage. La suite de ce travail présente l'analyse descriptive et les résultats du modèle statistique.

## Partie III – Résultats

Les résultats présentés ci-après résultent de l'application de la méthodologie développée appliquée aux 656 parcelles situées aux alentours de la *treeline* pyrénéenne. A partir des rasters classifiés forêt/non forêt et du MNT de l'IGN-F différents indicateurs ont été calculés. Nous détaillerons tout d'abord l'analyse diachronique réalisée pour mettre en évidence les dynamiques forestières de colonisation/décolonisation, puis nous présenterons les résultats descriptifs sur les indicateurs topo-géomorphologiques avant d'analyser les liens de corrélation entre l'ensemble des indicateurs identifiés et déterminés. Les scripts R utilisés dans le cadre de ce mémoire sont disponibles sur le Gitlab du projet : <https://gitlab.huma-num.fr/tfeuille/spacingtree>

### A - L'analyse diachronique de la *treeline*

#### 1 - Catégorisation et comptabilisation des pixels

A partir de l'analyse diachronique des rasters classifiés, nous avons mis en évidence quatre classes de pixels.

Le tableau 5 présente les statistiques basiques pour chaque état de pixel. Les 656 parcelles cumulent 314 360 566 pixels à partir d'une résolution (taille de pixels) de 50 cm, soit environ 7 850 hectares. La classe « maintien sol nu », comptabilise 194 441 576 pixels, soit 61,9% du total. La classe « décolonisation » comptabilise 9 075 891 pixels (2,9%). La classe « colonisation » comptabilise 61 497 056 pixels (19,6%). Enfin, la classe « maintien forêt » comprend 49 346 043 pixels (15,7%).

Tableau 5 - Résultats des analyses diachroniques. Le minimum, la médiane et le maximum sont des données au niveau de la parcelle (chaque parcelle comprenant 480 000 pixels)

Classes	Somme (n=656)	%	Ha	Minimum	Médiane	Maximum
Maintien sol nu	194 441 576	61,9	4 860	77 361 (28,9%)	296 770	458 116 (95,2%)
Décolonisation	9 075 891	2,9	227	0 (0%)	7 872	198 957 (41,4%)
Colonisation	61 497 056	19,6	1 537	5 284 (2%)	82 873	301 127 (62,6%)
Maintien forêt	49 346 043	15,7	1 226	33 (0%)	51 572	357 812 (74,4%)
Total	314 360 566	100	7 850			

## 2 - Comparaison de dynamique diachronique de la *treeline*

Chaque parcelle contient 480 000 pixels. La classe "maintien sol nu" (pixel de valeur 0) représente la classe la plus importante. La tendance principale observée au sein des parcelles est donc un maintien de surface sans forêt. Cette classe peut atteindre jusqu'à 95,2% d'une parcelle et a pour minimum 77 361 (28,9%).

La décolonisation (pixel de valeur 1) est minoritaire mais peut atteindre 41,4% de l'ensemble d'une parcelle. La dynamique de « colonisation » (pixel de valeur 10) est importante et atteint en moyenn presque 20% de tous les pixels étudiés. Elle peut atteindre 62,6% d'une parcelle avec 301 127 pixels.

Cette première analyse descriptive nous permet d'observer qu'environ 20% des pixels situés au niveau de la *treeline* ont été colonisés par l'arbre au cours des 70 dernières années (Figure 20).

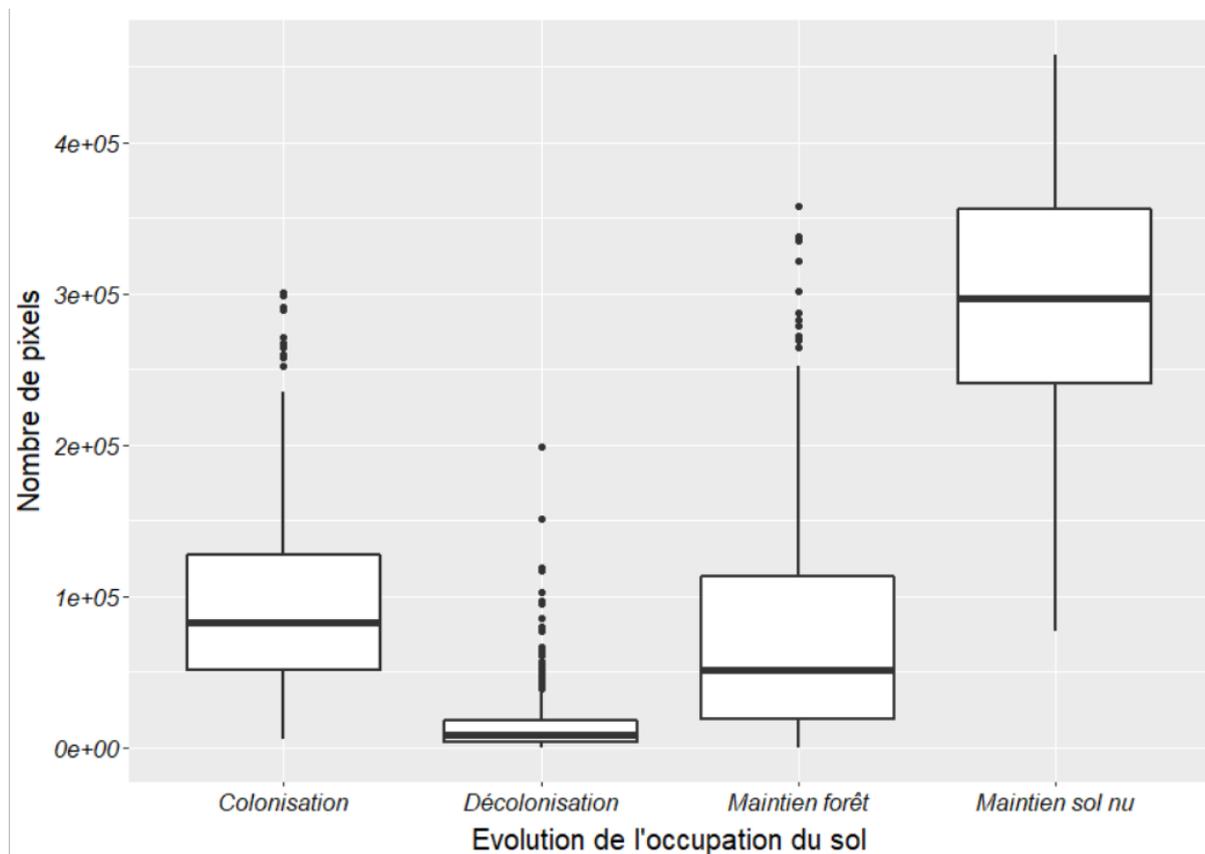


Figure 20 – Boîtes à moustaches décrivant les profils essentiels des classes obtenues par l'analyse diachronique des rasters classifiés forêt/non forêt

## B - Les indicateurs topographiques dérivés du MNT

Nous avons étudié un ensemble d'indicateurs dérivés du MNT. Au total, afin de bien caractériser l'espace d'étude, nous avons sélectionné onze indicateurs : altitude, pente, orientation, *wind exposition index*, *valley depth*, *visible sky*, *sky View factor*, *morphometric protection index*, *topographic wetness index*, *topographic ruggedness index*, *topographic position index*. Le tableau suivant présente la moyenne, la médiane et l'écart-type pour l'ensemble des données topographiques (tableau 6).

Tableau 6 - Description des variables topographiques (moyenne des moyennes de chaque parcelle)

Variable	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Minimum	Maximum
<b>Altitude</b>	1 825	1 728	319	1 012	2 486
<b>Pente</b>	28	28	7	6	49
<b>Orientation</b>	182	178	80	39	327
<b>TWI</b>	0,14	0,13	0,05	0,04	0,4
<b>TPI</b>	0,0001	0,0001	0,00008	-0,0022	0,0025
<b>TRI</b>	1,39	1,38	0,44	0,26	3,07
<b>MPI</b>	0,16	0,16	0,05	0,03	0,31
<b>VD</b>	4,6	1,7	9,5	0	104
<b>WEI</b>	1,024	1,02	0,01	0,99	1,05
<b>SVF</b>	0,92	0,92	0,04	0,78	1
<b>VS</b>	86	85,8	3,7	73,7	96,6

Le graphique suivant présente la matrice de corrélation entre chaque variable (Figure 21). A partir de cette matrice et des caractéristiques des différents indicateurs présentés dans le tableau 6, nous avons regroupé certains indicateurs afin de dégager trois groupes de proxies liés au milieu étudié : le niveau de protection d'une surface, des indicateurs sur le niveau d'intensité potentiel des processus gravitaires et enfin le niveau d'ouverture, de ciel visible de la surface.

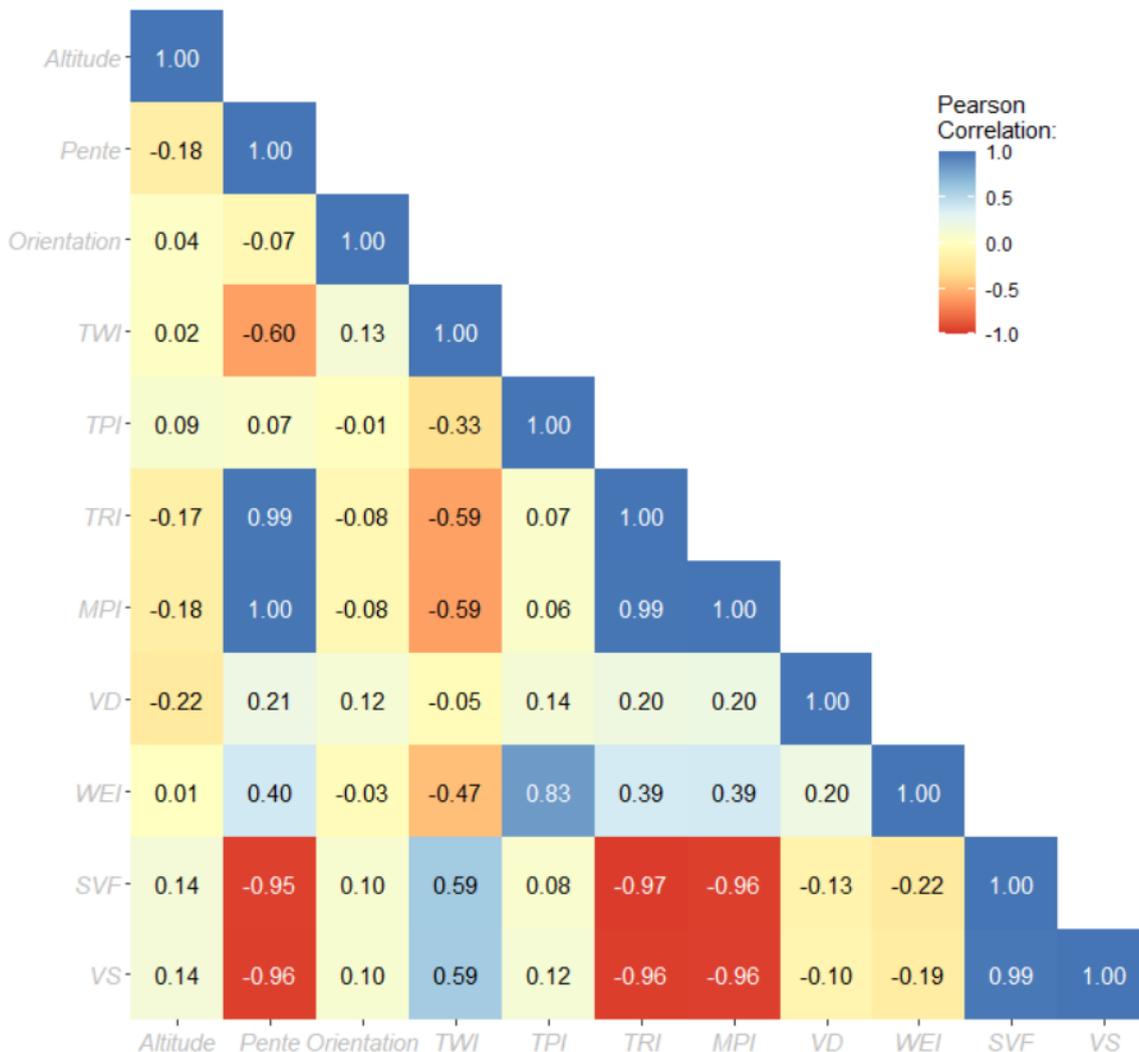


Figure 21 - Matrice de corrélation des onze indicateurs topographiques

Ainsi, nous observons que :

- Le *topographic position index* et *wind exposition index* sont très corrélés, ces indicateurs permettant de mesurer le niveau protection qu'offre une surface, c'est-à-dire un espace-refuge au sens de Resler (2006) qui permet de faciliter le développement de l'arbre en créant des conditions de site plus favorables.
- La pente est fortement corrélée au *topographic ruggedness index*, au *morphometric protection index* et au *valley depth*, ces indicateurs permettant de donner des indications sur le niveau potentiel de l'intensité des processus gravitaires.
- Le *sky view factor*, le *visible sky* et le taux d'humidité (*topographic wetness index*) sont également bien corrélés (Kopecky *et al.*, 2021). Ces facteurs mesurent le niveau d'ouverture et le niveau d'humidité d'une surface. Ici, une surface bien ouverte sur le ciel est une surface où le niveau d'humidité est le plus fort. La surface de captation des eaux est donc bien corrélée à la surface de ciel dégagée.

- L'altitude et l'orientation n'ont pas de forte corrélation entre elles et avec d'autres indicateurs.

## C - L'analyse des géomorphons

Les résultats sont présentés en trois sections. La première section présente la proportion des classes de géomorphons en fonction de la valeur du rayon de recherche. La deuxième section présente les statistiques descriptives des géomorphons pour un rayon de recherche de 30 pixels. Enfin, dans une dernière partie, nous présenterons les résultats des tests de validation liés à la matrice de confusion.

### 1 - Proportion de géomorphons par valeur de rayon de recherche

L'étude des géomorphons à partir de rasters possédant une résolution de 1m nous conduit à chercher le meilleur choix de rayon de recherche. Comme évoqué dans la partie II, l'algorithme *Geomorphons* fait converger les caractéristiques du terrain avec l'augmentation du rayon de recherche (Figure 22). Nous observons qu'il n'y a plus qu'une légère différence à partir du rayon de recherche L30.

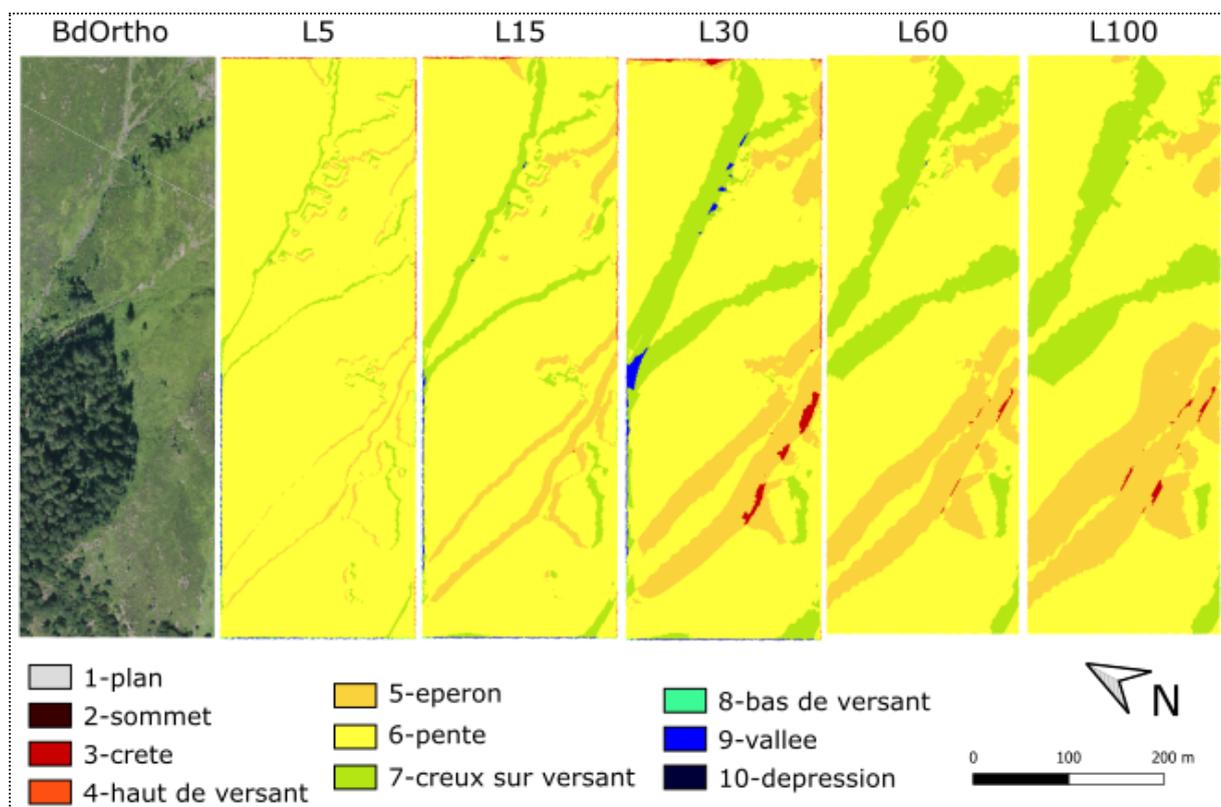


Figure 22 - Représentation des géomorphons de la parcelle 254 en fonction de différents rayons de recherche (lookup distance) : L5, L15, L30, L60 et L100.

Nous avons également représenté dans le tableau suivant (tableau 7) la proportion des dix classes de géomorphons en fonction de cinq valeurs de rayon de recherche. Nous observons que la classe "pente" (géomorphon #6) est la classe la plus représentée pour chaque distance. En revanche, plus le rayon de recherche augmente et plus elle diminue. La classe "creux de versant" (géomorphon #7) ne représente que 2,4% des pixels dans un rayon de recherche de 5, mais augmente à environ 10% dans les rayons de recherche les plus élevés.

Ainsi, le choix s'est porté sur le rayon de recherche 30 (L30), car il permet de maximiser le volume de pixels classés dans les catégories #7 (9,25%) et #9 (0,79%), catégories qui nous intéressent le plus dans ce travail, tout en conservant une représentation qui se rapproche le plus de la réalité du terrain observée sur l'orthophotographie (Figure 22) et en gardant un haut niveau de précision (79,9% pour un rayon de recherche de 30, 72% pour un rayon de recherche de 60 et 80,8% pour un rayon de recherche de 100, voir partie C-3).

*Tableau 7 - Proportion des types de géomorphons en fonction des distances de regard (lookup distance) à partir du MNT 1m*

%	L5	L15	L30	L60	L100
<b>1-Plan</b>	0,07	0,04	0,01	0,01	0,00
<b>2-Sommet</b>	0,01	0,03	0,09	0,05	0,06
<b>3-Crête</b>	0,15	0,32	0,84	0,66	0,95
<b>4-Haut de versant</b>	0,16	0,11	0,08	0,01	0,01
<b>5-Eperon</b>	2,4	5,37	10,01	9,85	11,94
<b>6-Pente</b>	94,45	88,54	78,78	80,19	76,05
<b>7-Creux de versant</b>	2,4	5,07	9,25	8,69	10,28
<b>8-Bas de versant</b>	0,18	0,13	0,11	0,04	0,03
<b>9-Vallée</b>	0,17	0,36	0,79	0,49	0,65
<b>10-Dépression</b>	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02

## 2 - Statistiques descriptives des géomorphons sur un rayon de recherche de 30 pixels

Nous obtenons sur l'ensemble du périmètre d'étude plus de 9% de pixels dans la classe qui nous intéresse le plus, la classe "creux de versant" (géomorphon #7). Ces pixels sont situés en moyenne à une altitude moyenne de 1 792 mètres, sur des pentes de 27 degrés et orientés en moyenne vers le sud (Tableau 8). Le tableau suivant nous permet de retrouver l'ensemble des caractéristiques moyennes au niveau des parcelles et uniquement au niveau du géomorphon #7 creux de versant.

Tableau 8 - Caractéristiques moyennes des pixels "creux de versant" (géomorphon #7) et de l'ensemble des parcelles

Variable	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Minimum	Maximum
<b>Altitude</b>					
<i>Parcelle</i>	1 825	1 728	319	1 012	2 486
<i>Géomorphon 7</i>	1 792	1 700	322	970	2 469
<b>Pente</b>					
<i>Parcelle</i>	28	28	7	6	49
<i>Géomorphon 7</i>	27	28	8	5	48
<b>Orientation</b>					
<i>Parcelle</i>	182	178	80	39	327
<i>Géomorphon 7</i>	180	174	74	44	316
<b>TWI</b>					
<i>Parcelle</i>	0,14	0,13	0,05	0,04	0,4
<i>Géomorphon 7</i>	0,26	0,25	0,11	0,06	0,74
<b>TPI</b>					
<i>Parcelle</i>	0,0001	0,0001	0,00008	-0,0022	0,0025
<i>Géomorphon 7</i>	-0,01	-0,008	0,008	-0,073	0,001
<b>TRI</b>					
<i>Parcelle</i>	1,39	1,38	0,44	0,26	3,07
<i>Géomorphon 7</i>	1,35	1,34	0,46	0,22	2,83
<b>MPI</b>					
<i>Parcelle</i>	0,16	0,16	0,05	0,03	0,31
<i>Géomorphon 7</i>	0,16	0,16	0,05	0,04	0,29
<b>VD</b>					
<i>Parcelle</i>	4,6	1,7	9,5	0	104
<i>Géomorphon 7</i>	10	5	17	0	176
<b>WEI</b>					
<i>Parcelle</i>	1,024	1,02	0,01	0,99	1,05
<i>Géomorphon 7</i>	0,993	0,994	0,014	0,945	1,025
<b>SVF</b>					
<i>Parcelle</i>	0,92	0,92	0,04	0,78	1
<i>Géomorphon 7</i>	0,91	0,91	0,04	0,77	1
<b>VS</b>					
<i>Parcelle</i>	86	85,8	3,7	73,7	96,6
<i>Géomorphon 7</i>	84,2	84,3	4,3	70,6	96,4

Nous observons que la plupart des indicateurs pour le géomorphon #7 correspondent aux valeurs moyennes de l'ensemble des parcelles. En revanche, l'indice *valley depth* (10) et le *TWI* (0,26) sont deux fois plus élevés en ce qui concerne les "creux de versant", pouvant ainsi signifier que nous avons identifié des espaces plus encaissés mais aussi des espaces présentant un taux d'humidité plus fort que sur le reste de la parcelle.

### 3 - Validation de la classification

À partir d'une matrice de confusion, nous pouvons calculer différents indicateurs quantitatifs renseignant sur le niveau qualité d'un travail de classification. Certains indicateurs renseignent sur la qualité de classification classe par classe et d'autres renseignent sur la qualité globale de la classification. Pour le calcul des indicateurs de qualité, nous nous baserons sur la matrice de confusion suivante qui correspond à la classification obtenue avec un rayon de recherche de 30 pixels (Tableau 9).

Tableau 9 - Matrice de confusion pour une distance de recherche de 30 pixels

		Orthophotographies (observés)		Total
		Creux de versant	Autres	
Orthophotographies (classifiés)	Creux de versant	178	19	197
	Autres	88	247	335
	Total	266	266	532

La précision globale de l'analyse se calcule en divisant la somme des pixels bien classés par la somme totale des pixels. Ici nous obtenons un niveau de précision de 79,9%. Le MCC est aussi utilisé comme indicateur de qualité global. Ici, nous obtenons un MCC de 0,64.

Nous avons également calculé la précision producteur (tableau 10). Il équivaut à la probabilité de prédire une valeur positive quand elle est positive. Ici, la probabilité de prédire la présence d'un creux de versant quand celui-ci est observé comme étant bien un creux de versant est de 90%.

Tableau 10 - Précision producteur

		Orthophotographies (observés)	
		Creux de versant	Autres
Orthophotographies (classifiés)	Creux de versant	0.90	0.10
	Autres	0.25	0.75

En considérant les proportions marginales non plus en colonne mais en ligne (donc d'après les effectifs totaux prédits), nous avons calculé la précision utilisateur qui correspond, pour une classe donnée, à la proportion d'échantillons bien classés parmi tous les prédits de la classe (tableau 11).

Tableau 11 - Précision utilisateur

		Orthophotographies (observés)	
		Creux de versant	Autres
Orthophotographies (classifiés)	Creux de versant	0.67	0.07
	Autres	0.33	0.93

Ainsi, la classification opérée par l'algorithme *Geomorphons* à un rayon de recherche 30 est au regard de tous ces indicateurs suffisamment robustes pour être utilisée comme appui de notre démonstration. Elle obtient un niveau de précision de près de 80%. Le MCC est supérieur à 0,6% ce qui est un bon niveau et les indicateurs de précision producteur et utilisateur sont aussi bien positionnés. Pour un rayon de recherche de 60 le niveau de précision n'est plus que de 72%, et pour un rayon de recherche de 100 le niveau de précision est équivalent à celui pour un rayon de recherche de 30 (80,8%), soit 5 pixels de plus observés "creux de versant" classés "creux de versant" (Tableau 12)

Tableau 12 - Matrice de confusion pour une distance de recherche de 100

		Orthophotographies (observés)		Total
		Creux de versant	Autres	
Orthophotographies (classifiés)	Creux de versant	183	19	202
	Autres	83	247	330
Total		266	266	532

## D - Modèle statistique : importance de l'altitude et des géomorphons comme variables explicatives de l'évolution de la *treeline*

L'objectif de cette partie est de présenter les résultats des analyses statistiques qui croisent l'ensemble des variables topographiques et géomorphologiques. Avant d'estimer le modèle statistique, nous observons la forme de la distribution de la variable à expliquer. Ici, nous souhaitons expliquer la colonisation de l'arbre. Visuellement, la distribution ne semble pas former une loi normale (Figure 23) mais le test normalité de Shapiro-Wilk, nous informe que cette variable suit bien une loi normale ( $p\text{-value} = 2.659e-14$ ).

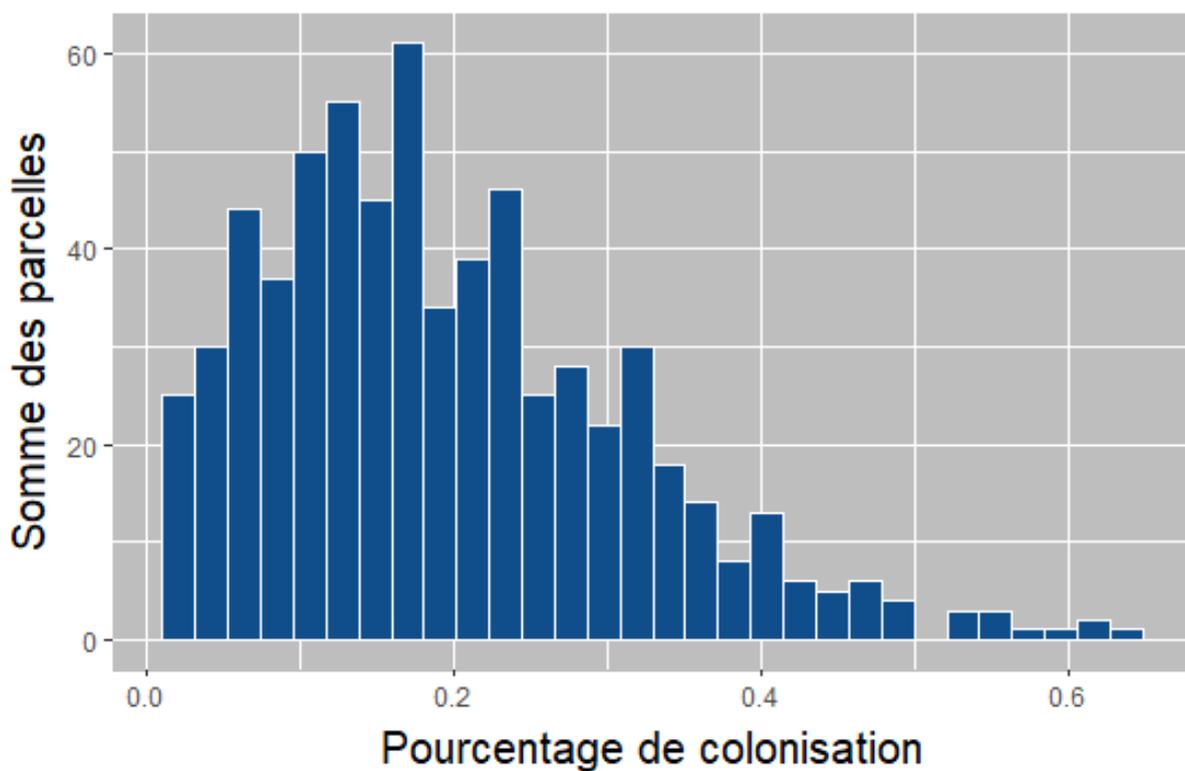


Figure 23 - Histogramme de la variable à expliquer "pourcentage de colonisation"

Les premiers résultats du modèle dans le tableau suivant (Tableau 13).

Tableau 13 - Résultat du modèle de régression généralisé sous la forme d'une régression bêta

Caractéristique	Beta	95% IC*	p-valeur	VIF*
Part de creux de versant	-0,1	-0,19 ; -0,01	0,028	2,9
Altitude	-0,1	-0,15 ; -0,04	<0,001	1,2
Pente	0,03	-0,63 ; 0,7	<0,9	161
Orientation	-0,04	-0,09 ; 0,02	0,2	1
TWI	0,09	0,01 ; 0,18	0,031	2,7
TPI	-0,12	-0,23 ; 0,00	0,049	4,8
TRI	-0,4	-1,2 ; 0,37	0,3	213
MPI	0,07	-0,64 ; 0,79	0,8	185
VD	-0,02	-0,08 - 0,04	0,4	1,3
WEI	0,19	0,05 - 0,32	0,007	6,5
SVF	-0,16	-0,65 - 0,33	0,5	87
VS	-0,11	-0,63 - 0,42	0,7	100

\*IC = Intervalle de confiance, VIF = Variance Inflation Factor

Nous supprimons toutes les variables où le *variance inflation factor* est supérieur à 2 (Tableau 14) afin de supprimer les principales colinéarités, c'est-à-dire des variables contenant des informations redondantes.

Tableau 14 - Résultats de la régression bêta en ne gardant que les valeurs avec un VIF < 2

Caractéristique	Beta	95% IC*	p-valeur	VIF*
Part de creux de versant	-0,1	-0,15 ; -0,04	<0,001	1,8
Altitude	-0,07	-0,12 ; -0,03	<0,001	1,1
Pente	0,01	-0,05 ; 0,06	0,8	1,7
Orientation	-0,03	-0,07 ; 0,01	0,2	1
TWI	0,04	-0,02 ; 0,1	0,2	2,2
TPI	-0,02	-0,08 ; 0,04	0,5	1,9
VD	-0,03	-0,07 ; 0,02	0,3	1,2

\* IC = Intervalle de confiance, VIF = Variance Inflation Factor

Nous observons que la variable géomorphons "creux de versant" (valeur #7 dans l'algorithme) et la variable "altitude" sont significatives (p-value < 0,001).

### *Conclusion de la partie III*

La modélisation statistique présentée ci-dessus a permis de mettre en évidence une relation significativement négative entre l'altitude et la part de pixels colonisés par l'arbre d'une part, et entre la part d'espaces en creux et cette colonisation d'autre part.

Contrairement à notre hypothèse qui envisageait les espaces en creux comme des éléments favorables au développement de l'arbre, nous observons que ces espaces concaves pourraient agir comme des espaces inhospitaliers où l'établissement des arbres est difficile mais nous n'avons pas suffisamment d'éléments pour l'affirmer.

## Partie IV – Discussion

Les résultats montrent que la méthode proposée dans ce travail permet d'identifier certains déterminants pouvant relier statistiquement des facteurs topo-géomorphologiques et la dynamique de la *treeline* pyrénéenne. Nous avons extrait quatre types d'évolution de la *treeline* : maintien sol nu, maintien forêt, colonisation et décolonisation. Les analyses montrent que l'altitude et la présence d'espaces en creux (ravines, talwegs, creux de versant) peuvent être reliées de manière significative à la colonisation. Nous tenterons dans cette partie d'apporter des éléments d'explications mais aussi de montrer certaines limites des différentes méthodologies employées.

### A - Quelles explications apporter à nos résultats ?

#### 1 - Pistes de réflexion sur les "espaces en creux"

Notre premier résultat concerne le lien entre la colonisation de la forêt et les espaces en creux. Nous observons que plus un espace dispose de zones concaves (i.e. creux de versant), moins la dynamique de colonisation est forte (pente = -0,1). Certaines études vont dans ce sens, quand d'autres montrent des résultats inverses.

Par exemple, Wardle (2008) montre que la *treeline* peut se situer plus haut en altitude sur des formes convexes de type éperon, et plus bas en altitude dans des ravines (*gullies*) et dans des têtes de vallée (*valley heads*). Cela rejoint les conclusions du travail présenté dans ce mémoire. Wardle explique cette organisation par une accumulation d'air froid dans les espaces concaves. Ainsi le froid serait une contrainte à la colonisation de l'arbre. D'autres études ont montré que la topographie et la concentration d'air froid, favorisant des épisodes de gel, pouvaient avoir un impact négatif sur la progression de la *treeline* (Tranquillini, 1979 ; Case, 2014). Dans l'étude proposée dans ce travail nous ne pouvons pas indiquer si l'accumulation de températures froides peut jouer un rôle aussi important sur la zone d'étude. Des relevés de températures sur le terrain seraient nécessaires pour valider ou non ces hypothèses.

Au contraire, Mihaila (2021) montre que la *treeline* progresse davantage sur les espaces concaves que sur les espaces convexes en reliant cette progression à une humidité plus importante favorable à la progression de l'arbre. Elle nuance ces observations en précisant qu'il existe des variations importantes en fonction du niveau d'ensoleillement. Aussi, pour un bon nombre d'auteurs, un environnement plus humide est considéré comme favorable pour le développement de l'arbre (Resler, 2005 ; Malanson, 2009 ; Sullivan, 2010 ; Holtmeier, 2017 ; Körner, 2018 ; Kopecky, 2021), or, nous n'observons pas de dynamique de colonisation. Les espaces en creux étudiés dans ce travail ont un *topographic wetness index* plus élevé que l'indice moyen obtenu en prenant en compte l'ensemble de la parcelle

(tableau 8). Ce qui suggère que ces espaces en creux sont significativement plus humides que les autres espaces. Ainsi, même si dans la littérature l'humidité des sols semble être un facteur important dans la dynamique de la *treeline*, elle ne semble pas constituer un facteur de contrôle dominant sur les espaces étudiés dans ce mémoire.

Nous avons également observé que les espaces en creux sont des espaces où la moyenne de l'indicateur de profondeur de vallée (*depth valley*) est deux fois supérieure à la moyenne de cet indicateur sur l'ensemble de la parcelle (tableau 8). Les espaces en creux pourraient donc, par leur configuration topographique être des espaces au sein desquels le niveau d'intensité des événements gravitaires (épisodes avalanches, glissements de terrain ou éboulements) serait plus élevé que sur les autres zones étudiées. Ces derniers représentant des obstacles à la colonisation de l'arbre du fait de l'instabilité des terrains, ceci explique la faible progression. Aussi, dans ce cadre, de précédentes études ont montré que les graines ne peuvent se déposer (Kambo et Danby, 2018) et les arbres se développer (Pachepsky and Rawls, 2004 ; Holtmeier, 2005 ; Maseroli, 2016, Cudlin, 2017). Ici les facteurs liés aux processus d'érosion pourraient être des facteurs de contrôle dominants les processus de développement de l'arbre.

#### b - Dynamique de colonisation : l'importance des activités humaines

Autre résultat important, plus l'altitude augmente, moins les pixels de colonisation sont importants. Ce résultat peut s'expliquer par la présence de l'Homme qui exerce une influence majeure sur l'évolution de la *treeline* à l'échelle locale. En effet, les résultats révélés dans le cadre de ce travail sont à tempérer au regard de l'importance des activités anthropiques et en particulier du pastoralisme.

L'altitude et la forme du relief agissent sur la *treeline*, mais rappelons que les régions montagneuses sont également fortement modulées par des changements démographiques, sociaux et économiques (Ameztegui et al., 2010, 2016). L'influence majeure de l'évolution de la *treeline* est la présence de l'homme et des pâturages (Speed, 2010). De plus en plus, la présence de l'Homme et des pâturages tend à diminuer (Martin, 2014, Kucsicsa, 2020) ce qui permet à la forêt de progresser en altitude. La réduction des activités agro-pastorales qui intervient dans un contexte de changement climatique devrait, à elle seule, accélérer l'expansion de la forêt (Cudlin, 2017). Ainsi, dans les années qui viennent, la colonisation de l'arbre devrait être corrélée positivement à la hausse de l'altitude. Cependant, il n'est pas simple de distinguer les impacts climatiques des impacts du pastoralisme (Motta et Nola, 2001) et, avec notre étude et nos résultats, nous ne pouvons pas dire que la déprise agricole entamée au milieu du XX<sup>e</sup> siècle conduise à une remontée de la forêt en altitude.

## B - Limites des méthodes utilisées

Nous avons fait le choix de la géomatique pour le traitement et la caractérisation de la dynamique de la *treeline* croisée à des indicateurs topo-géomorphologiques. Les *rasters* de haute résolution nous ont permis de caractériser la dynamique et ses facteurs explicatifs. Nous pensons que l'usage de la géomatique est une bonne solution mais que l'analyse faite dans ce travail au niveau de l'unité de la parcelle devrait se faire au niveau de l'unité du pixel.

### 1 - La caractérisation des formes du paysage comme première approche

L'algorithme *Geomorphons* est une solution *open-source*, simple d'utilisation, rapide et donne un résultat satisfaisant même s'il trace une ligne stricte entre les objets alors que les transitions entre les différentes formes du paysage ne sont pas toujours tranchées. L'algorithme est suffisamment robuste pour servir de première analyse géomorphologique. Il est efficace dans la reconnaissance de terrasses fluviales, de réseau hydrographique ou bien encore de plaine littorale (Gioia, 2021). Ainsi, évaluer la variabilité des formes du paysage permet d'étudier les formes concaves et convexes afin de mieux saisir les dynamiques paysagères (Amatulli, 2020).

Aussi avec *Geomorphons*, nous avons vu l'importance du choix du paramètre *lookup distance*. Pour une analyse plus fine de l'objet talweg, il faudrait pouvoir coupler les résultats de ce travail avec des observations effectuées directement sur le terrain. En effet, une analyse géomorphologique détaillée effectuée sur le terrain est toujours utile pour identifier précisément les formes du paysage (Dobre *et al.*, 2021 ; Gioia, 2021). Par exemple, la parcelle 498 est la parcelle qui contient le plus de pixel de colonisation (pixel 10), avec 301 127 pixels (Tableau 5). Or, cette parcelle ne contient presque qu'exclusivement des pixels de pente (95,6% de géomorphon #6) (Figure 24).

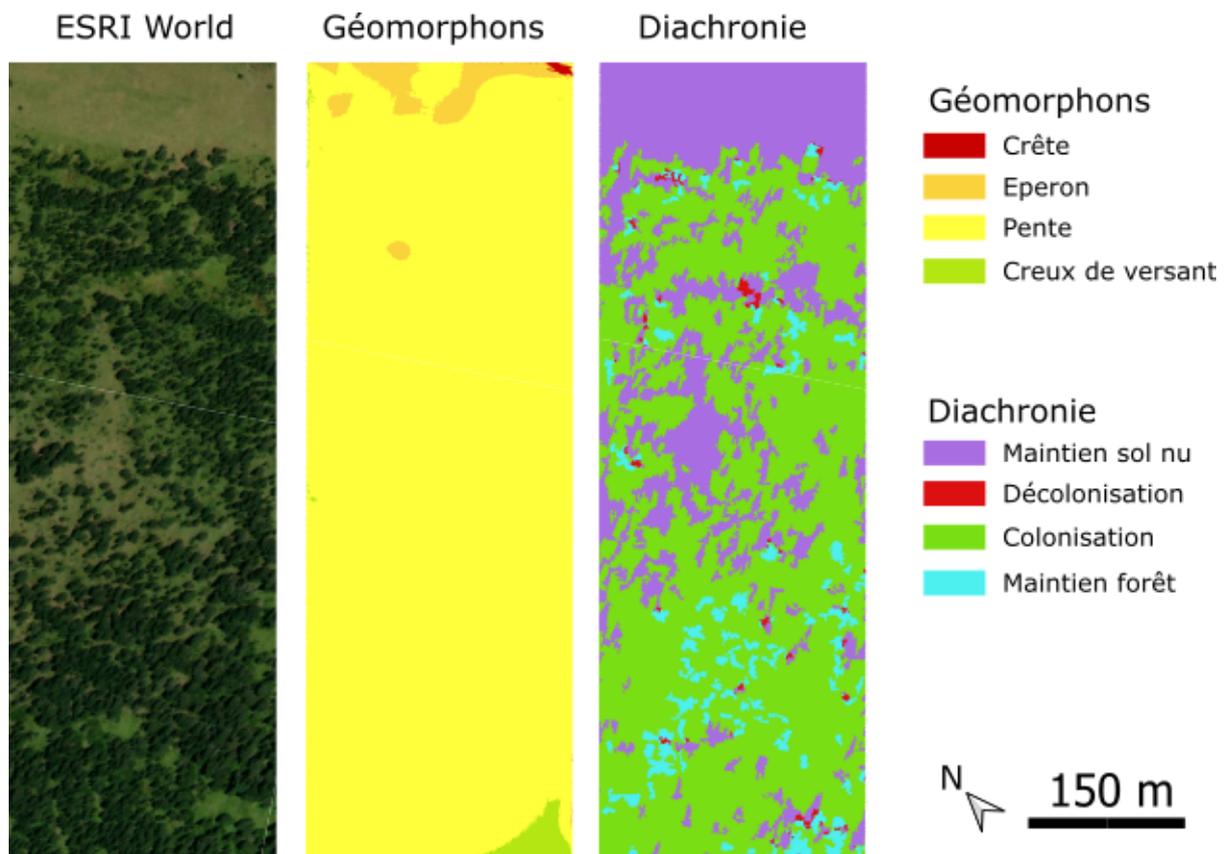


Figure 24 - Géomorphons et pixels diachroniques pour la parcelle 498

Avec des données terrain, il serait possible d'affiner le choix du rayon de recherche et ainsi de potentiellement développer une typologie plus détaillée de géomorphons pour une meilleure compréhension des processus de colonisation.

A travers la caractérisation topo-géomorphologique effectuée dans ce travail de mémoire, nous participons à la détermination de zones d'étude spécifiques. En effet, dans le cadre du projet ANR SpatialTreeP, ce travail doit servir à identifier des sites à haut potentiel scientifique qui serviront à caractériser et à comprendre l'évolution de la *treeline* à l'échelle locale.

## 2 - Optimisation des analyses statistiques : de l'unité parcelle à l'unité pixel

Les caractéristiques des parcelles sont issues de calculs de moyennes ou de calculs de ratio. Nous travaillons à partir d'un individu statistique qui correspond à une parcelle. Il serait intéressant de pousser l'analyse en utilisant les caractéristiques d'un ensemble de pixels contenus dans les parcelles. L'individu statistique deviendrait le pixel. En effet, en restant au niveau de la parcelle nous ne percevons pas les nuances qui peuvent apparaître au sein de chacune, car nous n'obtenons que des valeurs moyennes. Par exemple, sur la parcelle 252 (Figure 25), nous identifions un secteur A et B avec des formes de terrain "creux de versant" (géomorphons #7). Le modèle statistique nous indique que plus une parcelle contient

de pixels “creux de versant” moins la forêt la colonise. Or, nous observons que certains espaces “creux de versant” correspondent à une dynamique “maintien sol nu” (espace A), ce qui va dans le sens des résultats, mais nous observons aussi que d’autres espaces contenant des “creux de versant” correspondent à des espaces de “colonisation” (espace B). Cet exemple illustre la nécessité de réaliser un travail d’analyse au niveau des pixels qui apportera un éclairage plus précis et nuancé sur la dynamique de la *treeline*. Nous n’avons pas pu aller jusqu’à ce niveau d’analyse par manque de temps.

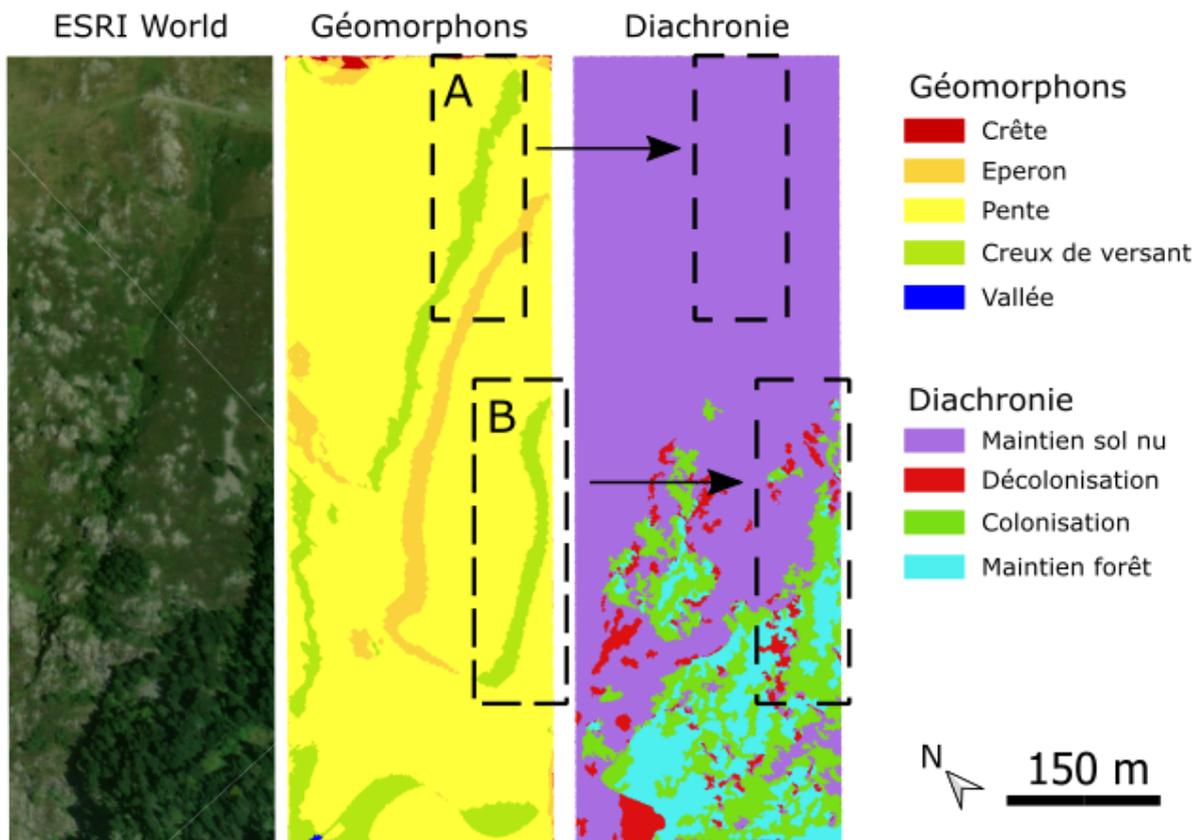


Figure 25 - Intérêt de travailler sur des unités pixels, l'exemple de la parcelle 252

## Conclusion générale

L'utilisation de MNT à haute résolution contribue à mieux comprendre la dynamique de la *treeline* pyrénéenne et à calculer plusieurs indicateurs topographiques et géomorphologiques. En utilisant un modèle de régression, nous avons pu identifier des liens statistiques entre, d'une part, l'altitude et la colonisation et, d'autre part, entre la part des espaces de creux de versant et cette même colonisation. Le premier résultat, nous indique que la hausse de l'altitude implique une baisse des pixels de colonisation. Le deuxième résultat, nous indique que la hausse de la part des pixels de creux de versant implique également une baisse des pixels de colonisation. Ainsi, cette analyse statistique a pu produire des résultats significatifs, et l'analyse par le traitement *Geomorphons* n'a pas confirmé l'hypothèse que nous avons proposée, à savoir que les espaces en creux sont des espaces favorables au développement de l'arbre. Au contraire, le modèle propose un lien inverse. Une étude plus poussée au niveau de l'unité statistique mais aussi avec des données issues d'une enquête de terrain permettrait de mieux comprendre les dynamiques de mobilité de la *treeline*.

Même si les espaces étudiés font finalement partie d'un système complexe, contre-intuitif, multifactoriel, qui reste complexe à lire, l'utilisation de la géomatique et des statistiques permet de mieux comprendre leur fonctionnement et de proposer des pistes de compréhension sur la dynamique de l'*Alpine Treeline Ecotone* dans les Pyrénées.

# Bibliographie

- Amatulli, G., McInerney, D., Sethi, T., Strobl, P., & Domisch, S. (2020). Geomorpho90m, empirical evaluation and accuracy assessment of global high-resolution geomorphometric layers. *Scientific Data*, 7(1), 162. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0479-6>
- Améztegui, A., Brotons, L., & Coll, L. (2010). Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees : Land-use changes drive *Pinus uncinata* expansion. *Global Ecology and Biogeography*, no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00550.x>
- Améztegui, A., Coll, L., Brotons, L., & Ninot, J. M. (2016). Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain tree line in the Pyrenees : Past human use drives upward tree line shift in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, 25(3), 263-273. <https://doi.org/10.1111/geb.12407>
- Astudillo-Sanchez, C., Fowler, M., Villanueva-Díaz, J., Agramont, A., & Soria-Díaz, L. (2019). Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii*, a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warming. *Trees*, 33. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01844-3>
- Bader, M. Y., Llambí, L. D., Case, B. S., Buckley, H. L., Toivonen, J. M., Camarero, J. J., Cairns, D. M., Brown, C. D., Wiegand, T., & Resler, L. M. (2021). A global framework for linking alpine-treeline ecotone patterns to underlying processes. *Ecography*, 44(2), 265-292. <https://doi.org/10.1111/ecog.05285>
- Bader, M. Y., & Ruijten, J. J. A. (2008). A topography-based model of forest cover at the alpine tree line in the tropical Andes. *Journal of Biogeography*, 35(4), 711-723. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01818.x>
- Bandura, P. (2016). Multi-scale Landform-based Recognition of Selected Mountain Peaks from DEMs in Slovakia. *Geographia Cassoviensis*, X, 107-121.
- Batllori, E., Camarero, J., Ninot, J., & Gutiérrez, E. (2009). Seedling recruitment, survival and facilitation in alpine *Pinus uncinata* tree line ecotones. Implications and potential responses to climate warming. *Global Ecology and Biogeography* *Global Ecol. Biogeogr.*, 18, 460-472. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00464.x>
- Batllori, E., & Gutiérrez, E. (2008). Batllori E, Guti??rrez E.. Regional treeline dynamics in response to global change in the Pyrenees. *J Ecol* 96 : 1275-1288. *Journal of Ecology*, 96, 1275-1288. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01429.x>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Birre, D. (en cours de préparation). Dynamique spatio-temporelle de la limite supérieure de la forêt dans les Pyrénées françaises : le rôle de l'anthropisation et des changements climatiques (thèse de doctorat, Université Sorbonne Paris Nord)
- Böhner, J., & Antoni?c, O. (2009). Chapter 8 Land-Surface Parameters Specific to TopoClimatology. *Developments in Soil Science*, 33. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00008-1)
- Borel, J.-L., & Ozenda (1920-2019), P. (1991). *Les conséquences possibles des changements climatiques dans l'Arc alpin*. <https://data.bnf.fr/fr/temp-work/c5098ad74f240fea04b59b58fd5ac290/>
- Brenning, A. (2008). Statistical Geocomputing combining R and SAGA: The Example of Landslide susceptibility Analysis with generalized additive Models. In J. Böhner, T. Blaschke, & L. Montanarella (Éds.), *SAGA — Seconds Out* (Vol. 19, p. 23-32). *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*.
- Brockmann-Jerosch, H. (1919). *Baumgrenze und Klimacharakter / von H. Brockmann-Jerosch. Rascher & Cie.*

- Brožová, N., Baggio, T., D'Agostino, V., Bühler, Y., & Bebi, P. (2021). Multiscale analysis of surface roughness for the improvement of natural hazard modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(11), 3539-3562. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3539-2021>
- Butler, D., Malanson, G., Walsh, S., & Fagre, D. (2007). Influences of Geomorphology and Geology on Alpine Treeline in the American West—More Important than Climatic Influences? *Physical Geography - PHYS GEOGR*, 28, 434-450. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.28.5.434>
- Camarero, J., & Gutiérrez, E. (2004). Pace and Pattern of Recent Treeline Dynamics : Response of Ecotones to Climatic Variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*, 63, 181-200. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000018507.71343.46>
- Case, B., & Buckley, H. (2015). Local-scale topoclimate effects on treeline elevations: A country-wide investigation of New Zealand's southern beech treelines. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.1334>
- Case, B. S., & Duncan, R. P. (2014). A novel framework for disentangling the scale-dependent influences of abiotic factors on alpine treeline position. *Ecography*, 37(9), 838-851. <https://doi.org/10.1111/ecog.00280>
- Chapin, F. S., Sturm, M., Serreze, M. C., McFadden, J. P., Key, J. R., Lloyd, A. H., McGuire, A. D., Rupp, T. S., Lynch, A. H., Schimel, J. P., Beringer, J., Chapman, W. L., Epstein, H. E., Euskirchen, E. S., Hinzman, L. D., Jia, G., Ping, C.-L., Tape, K. D., Thompson, C. D. C., ... Welker, J. M. (2005). Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming. *Science*, 310(5748), 657-660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
- Chhetri, P. K., Shrestha, K. B., & Cairns, D. M. (2017). Topography and human disturbances are major controlling factors in treeline pattern at Barun and Manang area in the Nepal Himalaya. *Journal of Mountain Science*, 14(1), 119-127. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4198-6>
- Chhetri, P. K., & Thai, E. (2019). Remote sensing and geographic information systems techniques in studies on treeline ecotone dynamics. *Journal of Forestry Research*, 30(5), 1543-1553. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00897-x>
- Cudlín, P., Cudlín, P., Cudlín, P., Tognetti, R., Malis, F., Alados, C., Bebi, P., Grunewald, K., Zhiyanski, M., Andonowski, V., La Porta, N., Bratanova-Doncheva, S., Kachaunova, E., Edwards-Jonášová, M., Ninot, J., Rigling, A., Hofgaard, A., Hlásny, T., Skalák, P., & Wielgolaski, F. (2017). Drivers of treeline shift in different European mountains. *Climate Research*, 73(1-2), 135-150. <https://doi.org/10.3354/cr01465>
- Cullen, L., Palmer, J., Duncan, R., & Stewart, G. (2001). Climate change and tree-ring relationships of *Nothofagus menziesii* tree-line forests. *Canadian Journal of Forest Research-revue Canadienne De Recherche Forestiere - CAN J FOREST RES*, 31, 1981-1991. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-11-1981>
- Danby, R., & Hik, D. (2007). Variability, contingency and rapid change in recent subarctic alpine tree line dynamics. *Journal of Ecology*, 95, 352-363. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01200.x>
- Dearborn, K. D., & Danby, R. K. (2017). Aspect and slope influence plant community composition more than elevation across forest-tundra ecotones in subarctic Canada. *Journal of Vegetation Science*, 28(3), 595-604. <https://doi.org/10.1111/jvs.12521>
- Dikau, R., Brabb, E. E., & Mark, R. M. (1991). Landform classification of New Mexico by computer. In *Open-File Report* (N° 91-634). U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey,. <https://doi.org/10.3133/ofr91634>
- Dobre, B., Kovács, I. P., & Bugya, T. (2021). Comparison of digital elevation models through the analysis of geomorphic surface remnants in the Desatoya Mountains, Nevada. *Transactions in GIS*, 25(5), 2262-2282. <https://doi.org/10.1111/tgis.12819>
- Elliott, G. P., & Kipfmüller, K. F. (2010). Multi-scale Influences of Slope Aspect and Spatial Pattern on Ecotonal Dynamics at Upper Treeline in the Southern Rocky Mountains, U.S.A. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42(1), 45-56. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.1.45>

- Evans, S. G., & Clague, J. J. (1994). Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology*, 10(1-4), 107-128. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90011-6)
- Ferrari, S., & Cribari-Neto, F. (2004). Beta Regression for Modelling Rates and Proportions. *Journal of Applied Statistics*, 31(7), 799-815. <https://doi.org/10.1080/0266476042000214501>
- Feuillet, T., Birre, D., Milian, J., Godard, V., Clauzel, C., & Serrano-Notivoli, R. (2020). Spatial dynamics of alpine tree lines under global warming : What explains the mismatch between tree densification and elevational upward shifts at the tree line ecotone? *Journal of Biogeography*, 47(5), 1056-1068. <https://doi.org/10.1111/jbi.13779>
- Frankl, A., Lenaerts, T., Radusinović, S., Spalevic, V., & Nyssen, J. (2016). The regional geomorphology of Montenegro mapped using Land Surface Parameters. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 60. <https://doi.org/10.1127/zfg/2016/0221>
- Gawrysiak, L., & Kociuba, W. (2020). Application of geomorphons for analysing changes in the morphology of a proglacial valley (case study : The Scott River, SW Svalbard). *Geomorphology*, 371, 107449. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107449>
- Gioia, D., Danese, M., Corrado, G., Di Leo, P., Minervino Amodio, A., & Schiattarella, M. (2021). Assessing the Prediction Accuracy of Geomorphon-Based Automated Landform Classification : An Example from the Ionian Coastal Belt of Southern Italy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 725. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110725>
- Goudie, A. (Éd.). (2004). *Encyclopedia of geomorphology*. Routledge : International Association of Geomorphologists.
- Guo, D., Zhang, H., Hou, G., Zhao, J., Liu, D., & Guo, X. (2014). Topographic controls on alpine treeline patterns on Changbai Mountain, China. *Journal of Mountain Science*, 11(2), 429-441. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2706-5>
- Harsch, M. A., & Bader, M. Y. (2011). Treeline form - a potential key to understanding treeline dynamics : The causes of treeline form. *Global Ecology and Biogeography*, 20(4), 582-596. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00622.x>
- Hermes, K., & 1924-. (1955). *Lage der oberen Waldgrenze in den Gebirgen der Erde und ihr Abstand zur Schneegrenze*. Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Köln. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Lage+der+oberen+Waldgrenze+in+den+Gebirge+n+der+Erde+und+ihr+Abstand+zur+Schneegrenze&author=Hermes%2C+Karl&publication\\_year=1955](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Lage+der+oberen+Waldgrenze+in+den+Gebirge+n+der+Erde+und+ihr+Abstand+zur+Schneegrenze&author=Hermes%2C+Karl&publication_year=1955)
- Holtmeier, F.-K. (2009). *Holtmeier, F.-K. (2009) : Mountain timberlines. Ecology, patchiness and dynamics. Advances in Global Change Research, Vol. 36, Berlin, Springer.*
- Holtmeier, F.-K., & Broll, G. (2005). Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales : Treeline and environmental change. *Global Ecology and Biogeography*, 14(5), 395-410. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00168.x>
- Holtmeier, F.-K., & Broll, G. (2011). Response of Scots Pine ( *Pinus sylvestris* ) to Warming Climate at Its Altitudinal Limit in Northernmost Subarctic Finland. *ARCTIC*, 64. <https://doi.org/10.14430/arctic4118>
- Holtmeier, F.-K., & Broll, G. (2017). Treelines—Approaches at Different Scales. *Sustainability*, 9(5), 808. <https://doi.org/10.3390/su9050808>
- Holtmeier, F.-K., & Broll, G. (2018). Subalpine Forest and Treeline Ecotone under the Influence of Disturbances : A Review. *Journal of Environmental Protection*, 09, 815-845. <https://doi.org/10.4236/jep.2018.97051>
- Holtmeier, F.-K., & Broll, G. (2019). Treeline Research—From the Roots of the Past to Present Time. A Review. *Forests*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.3390/f11010038>
- Humboldt, A. V., & Bonpland, Aimé. (1807). Essay on the Geography of Plants (1807). In L. Robin, S. Sörlin, & P. Warde (Éds.), *The Future of Nature* (p. 205-219). Yale University Press. <https://doi.org/10.12987/9780300188479-020>

- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Vol. In Press*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. (2012). Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Kambo, D., & Danby, R. K. (2018). Factors influencing the establishment and growth of tree seedlings at Subarctic alpine treelines. *Ecosphere*, 9(4). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2176>
- Kopecký, M., Macek, M., & Wild, J. (2021). Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *Science of The Total Environment*, 757, 143785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143785>
- Körner, C. (1999). *Alpine Plant Life*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-98018-3>
- Körner, C. (2003). *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems; with 47 Tables*. Springer Science & Business Media.
- Körner, C. (2012). Treelines Will be Understood Once the Functional Difference Between a Tree and a Shrub Is. *Ambio*, 41 Suppl 3, 197-206. <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0313-2>
- Körner, C. (2018). Concepts in empirical plant ecology. *Plant Ecology & Diversity*, 11, 1-24. <https://doi.org/10.1080/17550874.2018.1540021>
- Körner, C., & Hiltbrunner, E. (2021). Why Is the Alpine Flora Comparatively Robust against Climatic Warming? *Diversity*, 13(8), 383. <https://doi.org/10.3390/d13080383>
- Körner, C., & Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures: Study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31(5), 713-732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x>
- Kucsicsa, G., & Balteanu, D. (2020). The influence of man-induced land-use change on the upper forest limit in the Romanian Carpathians. *European Journal of Forest Research*, 139. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01293-5>
- Leonelli, G., Masseroli, A., & Pelfini, M. (2016). The influence of topographic variables on treeline trees under different environmental conditions. *Physical Geography*, 37(1), 56-72. <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1153377>
- MacDonald, G., Szeicz, J., Claricoates, J., & Dale, K. (1998). Response of the Central Canadian Treeline to Recent Climatic Changes. *Annals of the Association of American Geographers*, 88, 183-208. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.00090>
- Malanson, G., Brown, D., Butler, D., Cairns, D., Fagre, D. B., & Walsh, S. J. (2009). Ecotone dynamics: Invasibility of alpine tundra by tree species from the subalpine forest. *The changing alpine treeline*, 12, 35-61.
- Malanson, G., Zeng, Y., Butler, D., & Resler, L. (2004). Advance of Trees and Krummholz Into Alpine Tundra. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Martin, B., Lherm, M., & Béranger, C. (2014). Évolutions et perspectives de l'élevage des ruminants dans les montagnes françaises. *INRAE Productions Animales*, 27(1), 5-16. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.1.3050>
- Masseroli, A., Leonelli, G., & et, al. (2016). The influence of geomorphological processes on the treeline position in Upper Valtellina (Central Italian Alps). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 39.2, 171-182. <https://doi.org/10.4461/GFDQ.2016.39.16>
- McIntire, E. J. B., Piper, F. I., & Fajardo, A. (2016). Wind exposure and light exposure, more than elevation-related temperature, limit tree line seedling abundance on three continents. *Journal of Ecology*, 104(5), 1379-1390. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12599>
- Mihăilă, D., Bistricean, P.-I., & Horodnic, V.-D. (2021). Drivers of Timberline Dynamics in Rodna Mountains, Northern Carpathians, Romania, over the Last 131 Years. *Sustainability*, 13(4), 2089. <https://doi.org/10.3390/su13042089>
- Miller, C. L., & Laflamme, R. A. (1958). *The digital terrain model—Theory & application*,. M.I.T. Photogrammetry Laboratory.

- Monna, F., Esin, Y., Magail, J., Granjon, L., Navarro, N., Wilczek, J., Saligny, L., Couette, S., Dumontet, A., & Chateau, C. (2018). Documenting carved stones by 3D modelling – Example of Mongolian deer stones. *Journal of Cultural Heritage*, 34, 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.021>
- Morley, P., Donoghue, D., Chen, J.-C., & Jump, A. (2020). Montane forest expansion at high elevations drives rapid reduction in non-forest area, despite no change in mean forest elevation. *Journal of Biogeography*, 47, 2405-2416. <https://doi.org/10.1111/jbi.13951>
- Motta, R., & Nola, P. (2001). Growth trends and dynamics in sub-alpine forest stands in the Varaita Valley (Piedmont, Italy) and their relationships with human activities and global change. *Journal of Vegetation Science*, 12(2), 219-230. <https://doi.org/10.2307/3236606>
- Oke, P. R., Allen, J. S., Miller, R. N., Egbert, G. D., Austin, J. A., Barth, J. A., Boyd, T. J., Kosro, P. M., & Levine, M. D. (2002). A Modeling Study of the Three-Dimensional Continental Shelf Circulation off Oregon. Part I: Model–Data Comparisons. *Journal of Physical Oceanography*, 32(5), 1360-1382. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<1360:AMSOTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<1360:AMSOTT>2.0.CO;2)
- Pachepsky, Y., & Rawls, W. J. (2004). *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. Elsevier Science. <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=1157386>
- Posch, M., & Kauppi, L. (1991). *Potential for Acidification of Forest Soils in Europe*. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3290-9\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3290-9_15)
- Puech, C., Thommeret, N., Kaiser, B., Bailly, J.-S., Jacome, A., Rey, F., & Mathys, N. (2009). MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : Des données aux tests d'application. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 15(2), 141-152. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7589>
- R. Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. <https://www.R-project.org/>
- Rammig, A., Fahse, L., Bugmann, H., & Bebi, P. (2006). Forest regeneration after disturbance : A modelling study for the Swiss Alps. *Forest Ecology and Management*, 222(1), 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.042>
- Resler, L. M. (2006). Geomorphic Controls of Spatial Pattern and Process at Alpine Treeline\*. *The Professional Geographer*, 58(2), 124-138. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9272.2006.00520.x>
- Resler, L. M., Butler, D. R., & Malanson, G. P. (2005). Topographic Shelter and Conifer Establishment and Mortality in an Alpine Environment, Glacier National Park, Montana. *Physical Geography*, 26(2), 112-125. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.26.2.112>
- Salzer, J., Nikkhoo, M., Walter, T. R., Sudhaus, H., Reyes-Dávila, G., Breton, M., & Arámbula, R. (2014). Satellite radar data reveal short-term pre-explosive displacements and a complex conduit system at Volcãjn de Colima, Mexico. *Frontiers in Earth Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00012>
- Sãrãşan, A., Józsa, E., Ardelean, A. C., & Drãguţ, L. (2019). Sensitivity of geomorphons to mapping specific landforms from a digital elevation model : A case study of drumlins. *Area*, 51(2), 257-267. <https://doi.org/10.1111/area.12451>
- Sheeren, D. (2020). Indicateurs de qualité d'une classification et biais d'interprétation, note de synthèse, Toulouse INP-ENSAT, 15 p.
- Speed, J. D. M., Austrheim, G., Hester, A. J., & Mysterud, A. (2010). Experimental evidence for herbivore limitation of the treeline. *Ecology*, 91(11), 3414-3420. <https://doi.org/10.1890/09-2300.1>
- Strahler, A. N. (1952). DYNAMIC BASIS OF GEOMORPHOLOGY. *Geological Society of America Bulletin*, 63(9), 923. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)
- Stueve, K. (2011). *Spatial variability of biotic and abiotic tree establishment constraints across a treeline ecotone in the Alaska Range*. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1890/09-1725.1>
- Sullivan, P., & Sveinbjörnsson, B. (2010). Microtopographic Control of Treeline Advance in Noatak National Preserve, Northwest Alaska. *Ecosystems*, 13, 275-285. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9318-5>

- Swift, T. P., & Kennedy, L. M. (2021). Beaver-Driven Peatland Ecotone Dynamics : Impoundment Detection Using Lidar and Geomorphon Analysis. *Land*, 10(12), 1333. <https://doi.org/10.3390/land10121333>
- Theurillat, J.-P., & Guisan, A. (2001). [No title found]. *Climatic Change*, 50(1/2), 77-109. <https://doi.org/10.1023/A:1010632015572>
- Thwaites, R. N., Brooks, A. P., Pietsch, T. J., & Spencer, J. R. (2022). What type of gully is that? The need for a classification of gullies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(1), 109-128. <https://doi.org/10.1002/esp.5291>
- Tranquillini, W. (1979). *Physiological Ecology of the Alpine Timberline : Tree Existence at High Altitudes with Special Reference to the European Alps*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67107-4>
- Treml, V., & Banaš, M. (2008). The Effect of Exposure on Alpine Treeline Position : A Case Study from the High Sudetes, Czech Republic. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40(4), 751-760. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(07-060\)\[TREML\]2.0.CO:2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(07-060)[TREML]2.0.CO:2)
- Treml, V., & Chuman, T. (2015). Ecotonal Dynamics of the Altitudinal Forest Limit are Affected by Terrain and Vegetation Structure Variables : An Example from the Sudetes Mountains in Central Europe. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47(1), 133-146. <https://doi.org/10.1657/AAAR0013-108>
- Treml, V., & Migoń, P. (2015). Controlling factors limiting timberline position and shifts in the Sudetes : A review. *Geographia Polonica*, 88, 55-70. <https://doi.org/10.7163/GPol.0015>
- Veselský, M., Bandura, P., Burian, L., Hrciníková, T., & Bella, P. (2015). Semi-automated recognition of planation surfaces and other flat landforms : A case study from the Aggtelek Karst, Hungary. *Open Geosciences*, 7. <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0063>
- Vitali, A., Urbinati, C., Weisberg, P. J., Urza, A. K., & Garbarino, M. (2018). Effects of natural and anthropogenic drivers on land-cover change and treeline dynamics in the Apennines (Italy). *Journal of Vegetation Science*, 29(2), 189-199. <https://doi.org/10.1111/jvs.12598>
- Vittoz, P., Bodin, J., Ungricht, S., Burga, C. A., & Walther, G. (2008). One century of vegetation change on Isla Persa, a nunatak in the Bernina massif in the Swiss Alps. *Journal of Vegetation Science*, 19(5), 671-680. <https://doi.org/10.3170/2008-8-18434>
- Wallentin, G., Tappeiner, U., Strobl, J., & Tasser, E. (2008). Understanding alpine tree line dynamics : An individual-based model. *Ecological Modelling*, 218(3), 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.07.005>
- Walsh, S. J., Butler, D. R., Allen, T. R., & Malanson, G. P. (1994). Influence of snow patterns and snow avalanches on the alpine treeline ecotone. *Journal of Vegetation Science*, 5(5), 657-672. <https://doi.org/10.2307/3235881>
- Walsh, S. J., Butler, D. R., Malanson, G. P., Crews-Meyer, K. A., Messina, J. P., & Xiao, N. (2003). Mapping, modeling, and visualization of the influences of geomorphic processes on the alpine treeline ecotone, Glacier National Park, MT, USA. *Geomorphology*, 53(1-2), 129-145.
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389-395. <https://doi.org/10.1038/416389a>
- Wardle, P. (2008). New Zealand Forest to Alpine Transitions in Global Context. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40(1), 240-249. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(06-066\)\[WARDLE\]2.0.CO:2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(06-066)[WARDLE]2.0.CO:2)
- Weisberg, P. J., & Baker, W. L. (1995). Spatial variation in tree regeneration in the forest-tundra ecotone, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Canadian Journal of Forest Research*, 25(8), 1326-1339. <https://doi.org/10.1139/x95-145>
- Wood, J. (1996). *The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models*. [Thesis, University of Leicester]. [https://leicester.figshare.com/articles/thesis/The\\_geomorphological\\_characterisation\\_of\\_Digital\\_Elevation\\_Models\\_/10152368/1](https://leicester.figshare.com/articles/thesis/The_geomorphological_characterisation_of_Digital_Elevation_Models_/10152368/1)

- Yokoyama, R., Shlrasawa, M., & Pike, R. J. (2002). *Visualizing topography by openness : A new application of image processing to digital elevation models: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v.*

# Liste des figures

● <b>Figure 1</b> - La limite de la forêt subalpine dans les environs de Valcebollère (Massif du Puigmal, Pyrénées-Orientales). Photographie : T. Feuillet, 2017.	10
● <b>Figure 2</b> - Les formes de la treeline (Harsch et Bader, 2011). (a) Forme diffuse. (b) Forme discrète. (c) Forme en îlot. (d) Krummholz (forme de croissance altérée par le vent d'un arbre).	11
● <b>Figure 3</b> - Limite inférieure des neiges perpétuelles à différentes latitudes.	12
● <b>Figure 4</b> - Les services écosystémiques de la forêt subalpine (Holtmeier, 2018)	13
● <b>Figure 5</b> - Approche bio-géomorphologique des dynamiques de la treeline (Resler, 2006)	14
● <b>Figure 6</b> - Etablissement d'un conifère sous la protection d'un abri rocheux (Resler, 2006)	16
● <b>Figure 7</b> - Carte de localisation du terrain d'étude situés dans les Pyrénées orientales : département de l'Ariège (09) et des Pyrénées-Orientales (66)	19
● <b>Figure 8</b> - Pin à crochets ( <i>Pinus uncinata</i> ), massif du Puigmal, 2150 m. Photographie : T. Feuillet (2021)	20
● <b>Figure 9</b> - Rectangle de 600 par 200 mètres. Parcelle 408 (secteur mont Valier).	21
● <b>Figure 10</b> - Périmètre d'étude et l'ensemble des 656 parcelles identifiées (en bleu)	22
● <b>Figure 11</b> - Orthophotographie historique, 1953 (à gauche) et orthophotographie actuelle, 2016 (à droite). Coordonnées de l'orthophotographie (carré rouge) : 550600, 6189900 (code EPSG:2154)	23
● <b>Figure 12</b> - Analyse diachronique de la parcelle 693. A : Orthophotographie actuelle (2016) ; B : Raster historique : classification pixel forêt / pixel non forêt en 1955 ; C : Raster actuel reclassifié : classification pixel forêt / pixel non forêt en 2015 ; D : Nouveau raster résultant de la somme du raster B et du raster C : Diachronie avec 4 classes présentant la dynamique forestière.	25
● <b>Figure 13</b> - Modèle numérique de terrain – RGE ALTI® 1 m..	26
● <b>Figure 14</b> - Exemple de ravine située dans la parcelle 252 (541124,3 ; 6193703.9. Code EPSG:2154)	30
● <b>Figure 15</b> - <i>Geomorphons</i> utilise des concepts de ligne de visée appliqués à l'identification des formes de relief. Il compare la position d'une cellule avec ses voisines en indiquant si elles se situent plus haut, à égale altitude ou plus bas en comparant les mesures d'angles au nadir et au zénith (Jasiewicz et Stepinski, 2012)	32
● <b>Figure 16</b> - Schéma de reconnaissance développé par Jasiewicz et Stepinski (2013)	33
● <b>Figure 17</b> - Identification des formes du paysage : <i>Flat</i> : plat, <i>summit</i> : sommet, <i>ridge</i> : crête, <i>shoulder</i> : haut de versant, <i>spur</i> : éperon, <i>slope</i> : pente, <i>hollow</i> : creux de versant, <i>footslope</i> : bas de versant, <i>valley</i> : vallée, <i>depression</i> : dépression (Jasiewicz et Stepinski, 2013)	33
● <b>Figure 18</b> - Matrice de confusion dans le cadre d'une classification (Sheeren, 2018)	34
● <b>Figure 19</b> - Interface RStudio "Ghost Orchid" Release 2021.09.2.	36
● <b>Figure 20</b> - Boîtes à moustaches décrivant les profils essentiels des classes obtenues par l'analyse diachronique des rasters classifiés forêt/non forêt	39
● <b>Figure 21</b> - Matrice de corrélation des onze indicateurs topographiques.	41
● <b>Figure 22</b> - Représentation des géomorphons de la parcelle 254 en fonction de différents rayons de recherche (lookup distance) : L5, L15, L30, L60 et L100.	42
● <b>Figure 23</b> - Histogramme de la variable à expliquer "pourcentage de colonisation"	47
● <b>Figure 24</b> - <i>Figure 24 - Géomorphons et pixels diachroniques pour la parcelle 498</i>	53
● <b>Figure 25</b> - Intérêt de travailler sur des unités pixels, l'exemple de la parcelle 252.	54

# Liste des tableaux

• <b>Tableau 1</b> - Valeurs des pixels des <i>rasters</i> binaires reclassifiés en 1950 et en 2010.	24
• <b>Tableau 2</b> - Méthodologie proposée pour l'analyse de la dynamique forestière.	24
• <b>Tableau 3</b> - Récapitulatif des variables topographiques.	29
• <b>Tableau 4</b> - Typologie des formes et des modelés d'incision selon leur taille et MNT permettant de les appréhender (Puech, 2009). A partir d'un MNT à une résolution de 1 mètre, nous pouvons détecter des "ravines" d'une largeur in situ allant de 10 mètres à quelques centaines de mètres	31
• <b>Tableau 5</b> - Résultats des analyses diachroniques. Le minimum, la médiane et la maximum sont des données au niveau de la parcelle (chaque parcelle comprenant 480 000 pixels)	38
• <b>Tableau 6</b> - Description des variables topographiques (moyenne des moyennes de chaque parcelle)	40
• <b>Tableau 7</b> - Proportion des types de géomorphons en fonction des distances de regard (lookup distance) à partir du MNT 1m	43
• <b>Tableau 8</b> - Caractéristiques moyennes des pixels "creux de versant" (géomorphon #7) et de l'ensemble des parcelles.	44
• <b>Tableau 9</b> - Matrice de confusion pour une distance de recherche de 30.	45
• <b>Tableau 10</b> - Précision producteur	45
• <b>Tableau 11</b> - Précision utilisateur	46
• <b>Tableau 12</b> - <i>Matrice de confusion pour une distance de recherche de 100.</i>	46
• <b>Tableau 13</b> - Résultat du modèle de régression généralisé sous la forme d'une régression bêta	48
• <b>Tableau 14</b> - Résultats de la régression bêta en ne gardant que les valeurs avec un VIF < 2	48