

Articulation des usages dans une vallée haut-alpine : Une approche fonctionnelle transversale



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur AgroParisTech

Dans le cadre de la dominante d'approfondissement « Gestion des Milieux Naturels »

Présenté par Ninon Fontaine

Stage effectué du 2 mars 2020 au 31 août 2020 – Soutenu le 8 octobre 2020

Organisme d'accueil : Equipe 'Approches Socio-écosystémiques des TeRRitoirEs' (ASTRRE) – Unité de recherche 'Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne' (UR LESSEM) – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE), centre de Grenoble (38)

Tuteur de stage : Isabelle BOULANGEAT, chargée de recherche en écologie

Enseignant référent : Christian PIEDALLU, enseignant-chercheur à AgroParisTech centre de Nancy

Illustration de couverture

Le refuge du Chardonnet dans la vallée de la Clarée – Hautes-Alpes

Crédit photographique : Ninon Fontaine.

Articulation des usages dans une vallée haut-alpine : Une approche fonctionnelle transversale

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur AgroParisTech

Dans le cadre de la dominante d'approfondissement « Gestion des Milieux Naturels »

Présenté par Ninon Fontaine

Stage effectué du 2 mars 2020 au 31 août 2020 – Soutenu le 8 octobre 2020

Organisme d'accueil : Equipe 'Approches Socio-écosystémiques des TeRRitoirEs' (ASTRRE) – Unité de recherche 'Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne' (UR LESSEM) – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE), centre de Grenoble (38)

Tuteur de stage : Isabelle BOULANGEAT, chargée de recherche en écologie

Enseignant référent : Christian PIEDALLU, enseignant-chercheur à AgroParisTech centre de Nancy

Résumé

Les écosystèmes montagnards sont très dynamiques, notamment dans un contexte de changement climatique. Afin d'anticiper les conséquences de ce dernier et s'y adapter, il est nécessaire de mieux comprendre le lien entre les caractéristiques des milieux de montagne et les nombreux usages qu'ils supportent.

Une approche transdisciplinaire et fonctionnelle à fine résolution spatiale a été développée au cours de ce stage, afin de pallier aux limites des différentes approches existantes qui, souvent, sont basées sur des expertises, ne sont pas spatialisées, ou se focalisent sur les usages humains en laissant de côté leur coexistence avec les usages animaux. Après avoir construit un cadre fonctionnel pour caractériser les milieux, des modèles de distribution des usages permettent de spatialiser les différents usages et/ou de déterminer des « niches d'usages » : les caractéristiques fonctionnelles des milieux sont ainsi reliées aux usages de la mégafaune, cette dernière intégrant les usagers humains et animaux. Les interrelations entre usages sont ensuite analysées via une approche réseau, qui met en évidence le caractère « spécialiste » ou « généraliste » des usages, ainsi qu'un potentiel effet d'évitement (« exclusion de niche »).

Mots clés : Cartographie Fonctionnelle, Ecosystèmes montagnards, Modèles de Distribution Spatiale, Niches, Usages

Abstract

In mountain ecosystems, species have to face a particularly rapid climate change. To anticipate and adapt to its consequences, a better understanding of the link between the characteristics of mountain environments and the uses they support is needed.

Common approaches are restricted by their large use of expertises, which are the result of complex and untrackable syntheses, and their use of land-use maps, limiting high spatial resolutions. Moreover, they usually focus on human uses without considering their coexistence with animal uses.

Here, we develop a novel, transdisciplinary and functional approach to describe at a fine resolution the links between the ecosystems and their uses. The first step in this study was to build a functional framework to characterize the environment. Then, uses were spatialized and « niches of uses » were determined with spatial distribution models: the functional characteristics of the environment were linked to the uses of the megafauna, that integrates human and animal users. The interrelationships between uses are finally analyzed with a network approach, that highlights the uses that are « specialist » or « generalist », as well as a potential avoidance effect, similar to « niche exclusion ».

Key words: Functional Mapping, Mountain Ecosystems, Spatial Distribution Models, Niches, Uses

Fiche signalétique d'un travail d'élève

AgroParisTech	TRAVAIL D'ÉLÈVE
TITRE : Articulation des usages dans une vallée haut alpine : une approche fonctionnelle transversale	Mots clés : Cartographie Fonctionnelle, Ecosystèmes montagnards, Modèles de Distribution Spatiale, Niches, Usages
AUTEUR ou AUTRICE : Ninon Fontaine	Année : 2020
Caractéristiques : 1 volume ; 116 pages (de la page de couverture à la fin des annexes) ; 14 figures ; 13 annexes ; bibliographie	

CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME DE STAGE : Equipe 'Approches Socio-écosystémiques des TeRRitoirEs' (ASTRRE) – Unité de recherche 'Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne' (UR LESSEM) – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE), centre de Grenoble (38)		
Nom du responsable : Isabelle Boulangeat		
Fonction : chargée de recherche en écologie		
Nom du correspondant APT : Christian Piedallu		
<input type="checkbox"/> 1A <input type="checkbox"/> 2A <input checked="" type="checkbox"/> 3A	<input type="checkbox"/> Stage entreprise <input type="checkbox"/> Stage assistant ingénieur <input checked="" type="checkbox"/> Stage fin d'études Date de remise : octobre 2020	<input type="checkbox"/> Autre

SUITE À DONNER (à compléter par AgroParisTech)
<input type="checkbox"/> Consultable et diffusable <input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente <input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au/...../..... , puis diffusable

Engagement de non-plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive ; recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages *in extenso*, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

③ Sanctions

- En cas de manquement à ces consignes, la direction des études et de la pédagogie ou le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

④ Engagement

Je soussigné (e) **Ninon Fontaine**, reconnais avoir lu et m'engage à respecter l'engagement de non-plagiat.

À **Grenoble** le **31 août 2020**.

Signature :



Cet engagement de non-plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce stage.

En premier lieu, je remercie tout particulièrement Isabelle Boulangeat, ma tutrice de stage, pour son soutien, ses conseils et ses réflexions, et pour tous les échanges que nous avons pu avoir, très enrichissants d'un point de vue personnel mais surtout scientifique.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidée tout au long du stage :

- Sandra Lavorel pour ses remarques en début de stage, qui ont participé au cadrage de l'étude ;
- Laure Vuinée, chargée de mission Natura 2000 à Névache, pour sa connaissance de la zone d'étude et les informations qu'elle a pu me fournir ;
- Roger Minard, berger, pour les détails concernant la gestion pastorale de l'alpage étudié ;
- Hugues François, Mylène Bonnefoy Demongeot, François Guilhaumon et Maxime Lenormand pour leur aide dans la construction de la base de données ;
- Renaud Jaunâtre, Yoan Paillet, Emilie Crouzat et l'équipe du CREA Mont-Blanc, pour leur aide sur le terrain, ainsi que les gardiens et aide-gardiens des refuges pour leur accueil lors de ces sessions de terrain ;
- Adeline François, pour avoir partagé son bureau, pour ses pistes de déblocage et pour l'organisation logistique des sessions de terrain ;
- l'équipe du LESSEM, que ce soit le service informatique, le service des ressources humaines, les stagiaires, ou encore les participants au café d'écologie et au café d'économie écologique, temps d'échanges scientifiques maintenus en visioconférence tout au long du confinement, malgré les conditions particulières qui ont marqué trois mois du stage.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	2
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux	6
Sigles et abréviations.....	7
Introduction	8
1. Contexte de l'étude et présentation de la démarche	11
1.1. Présentation du site du Chardonnet.....	11
1.2. Démarche mise en place.....	14
1.2.1. Une approche fonctionnelle originale pour qualifier les milieux et déterminer leurs liens avec les usages.....	14
1.2.2. Une analyse spatiale des milieux et des usages à fine résolution.....	15
1.2.3. Des usages par les humains mais aussi par les animaux	15
1.2.4. Des caractéristiques fonctionnelles organisées en dimensions.....	17
2. Construction de la base de données.....	20
2.1. Approche saisonnière	20
2.2. Caractéristiques fonctionnelles des milieux.....	20
2.2.1. Sept dimensions déclinées en caractéristiques fonctionnelles décrivant les milieux	20
2.2.2. Les caractéristiques fonctionnelles issues d'informations topographiques.....	22
2.2.3. Le calcul de variables climatiques à partir du modèle SAFRAN-CROCUS.....	23
2.2.4. L'apport de l'imagerie satellite	25
2.2.5. Les informations apportées par les bases de données associées aux usages récréatifs..	25
2.2.6. Des caractéristiques fonctionnelles réinterprétées à partir de la cartographie d'habitats et d'informations complémentaires non spatialisées.....	26
2.2.6.1. Caractérisation de chaque type d'habitat Natura 2000 présent sur le site	26
2.2.6.2. Transposition de l'information par habitat à des caractéristiques par pixel	27
2.2.6.3. Autres calculs basés sur la cartographie des habitats : la connectivité et la diversité locale en habitats	28
2.2.7. Le calcul des chemins de moindre coût.....	28
2.2.8. Le calcul des cônes de visibilité et des variables associées.....	29
2.2.9. D'autres sources de données spatiales permettant de compléter la base de caractéristiques fonctionnelles.....	31
2.3. Discussion concernant la construction de la base de données : une dépendance forte à la disponibilité des informations	31
3. Description fonctionnelle des milieux par analyses multivariées.....	33
3.1. Méthode mise en place	33

3.1.1.	Réduction de la base de données selon les sept dimensions retenues	33
3.1.2.	Recherche de groupes de pixels fonctionnellement similaires	34
3.2.	Résultats	35
3.2.1.	Analyses en Composantes Principales sur chacune des dimensions, et dégagement de sous-dimensions	35
3.2.2.	Localisation des groupes de pixels similaires.....	38
3.3.	Discussion	43
3.3.1.	Un cadre d'analyse qui permet de valoriser et d'intégrer une multitude de données de natures différentes	43
3.3.2.	L'apport de la méthode relativement aux cartographies d'habitats.....	43
4.	Détermination des niches d'usage	45
4.1.	Méthode mise en place	45
4.1.1.	Construction de la base de données d'usages.....	45
4.1.1.1.	Les usages animaux (non domestiques)	45
4.1.1.2.	L'usage pastoral.....	45
4.1.1.3.	Les usages récréatifs.....	46
4.1.2.	Modélisation des niches d'usage et évaluation des modèles obtenus.....	46
4.1.3.	Evaluation de la participation des variables explicatives dans chaque modèle.....	47
4.1.4.	Comparaison des modèles obtenus à des modèles plus « simples », basés uniquement sur l'habitat Natura 2000.....	48
4.2.	Résultats	48
4.2.1.	Résultats généraux pour les modèles de niche d'usage.....	48
4.2.2.	Spécificités des modèles d'usage obtenus	48
4.2.3.	Focus sur l'usage pastoral	54
4.3.	Discussion	55
4.3.1.	Des écarts entre hypothèses initiales et modèles obtenus : trois exemples	55
4.3.2.	Des scores variables selon le type d'usages	57
4.3.3.	Une dépendance à la méthode utilisée.....	58
4.3.4.	Le cas de l'usage pastoral lié aux couchades	58
5.	Analyse réseau et rapport entre usages.....	60
5.1.	Méthode mise en place	60
5.1.1.	Lien usage-pixel et réseaux bipartis	60
5.1.2.	Lien entre usages et réseaux pondérés.....	60
5.2.	Résultats	61
5.2.1.	Densité d'usages sur l'unité pastorale	61
5.2.2.	Relations entre usages	63
5.3.	Discussion	64

5.3.1. Le multi-usage sur l'unité pastorale : entre caractère favorable des conditions et exclusion de niche	64
5.3.2. La spécialisation ou non au sein d'un réseau : une approche intéressante pour les conflits d'usage.....	65
5.3.3. Les limites de l'approche réseau pour cette étude.....	65
6. Conclusion, bilan et perspectives de l'étude	66
Références bibliographiques	68
Liste des contacts.....	75
Annexes.....	76

Liste des figures

Figure 1 : Approches existantes pour caractériser les écosystèmes et usages	8
Figure 2 : Localisation de l'unité pastorale du Chardonnet (délimitation en rouge).....	11
Figure 3 : Parallèle entre des démarches de cartographie de services écosystémiques fréquentes et la démarche mise en place dans cette étude	14
Figure 4 : Présentation des sept dimensions cadrant la description fonctionnelle des milieux	18
Figure 5 : La chaîne de simulation S2M, utilisée pour la caractérisation des conditions climatiques des pixels	23
Figure 6 : Procédure mise en place pour réduire le tableau des caractéristiques fonctionnelles des pixels	34
Figure 7 : Résultat de l'ACP appliquée au tableau de caractéristiques fonctionnelles des couples pixel-saison, tableau réduit en quatorze axes.....	39
Figure 8 : Coloration des pixels de l'unité pastorale du Chardonnet selon leurs similarités en termes de caractéristiques fonctionnelles	41
Figure 9 : Décomposition des images selon les bandes RVB, associées aux coordonnées des pixels sur les trois premiers axes de l'ACP	42
Figure 10 : Comparaison des zones de couchades effectives et prédites par les modèles (dites "potentielles").....	55
Figure 11 : Degré des pixels dans le réseau biparti pixels – usages.....	61
Figure 12 : Lien entre les caractéristiques fonctionnelles des couples pixel-saison et le nombre d'usages qu'ils supportent	62
Figure 13 : Degré moyen de différentes catégories de nœuds, dans le réseau biparti pixel-été - usages	63
Figure 14 : Indice de spécialisation des usages considérés dans l'étude	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Types de milieux présents sur le site d'étude (source : DOCOB)	12
Tableau 2 : Usages par la mégafaune présente sur la zone d'étude et surface potentielle associée à l'usage.....	16
Tableau 3 : Déclinaison des sept dimensions en caractéristiques fonctionnelles, correspondant à des variables et proxies.....	21
Tableau 4 : Classes des tuiles unitaires utilisées pour les simulations de la chaîne S2M	24
Tableau 5 : Caractères indicateurs retenus et valeurs possibles	26
Tableau 6 : Notes de qualité esthétique de différents types de milieux, utilisées pour évaluer la qualité scénique du paysage visible depuis chaque pixel.....	30
Tableau 7 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées au contexte spatial des pixels (dimension 1).....	35
Tableau 8 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à l'accessibilité des pixels (dimension 2).....	35
Tableau 9 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques géophysiques des pixels (dimension 3).....	36
Tableau 10 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées aux ressources non consommables présentes sur les pixels (dimension 4).....	36
Tableau 11 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à la qualité des ressources consommables présentes sur les pixels (dimension 5).....	36
Tableau 12 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à la quantité de ressources consommables présente sur les pixels (dimension 6).....	37
Tableau 13 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à la présence d'infrastructures sur les pixels (dimension 7).....	37
Tableau 14 : Sous-dimensions résumant les caractéristiques fonctionnelles des pixels de l'unité pastorale.	37
Tableau 15 : Scores moyens des modèles d'usage (20 usages modélisés)	48
Tableau 16 : Résultats des modélisations de présence / absence des usages.	49

Sigles et abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

AIC : critère d'information d'Akaike (*Akaike Information Criterion*)

AUC : aire sous la courbe (*Area Under Curve* – concerne l'aire sous la courbe *ROC Receiver Operating Characteristic*)

CLPA : Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche

DOCOB : Document d'Objectifs

GDD : degrés-jours de croissance (*Growing Degree Days*)

GLM : Modèles Linéaires Généralisés (*Generalized Linear Models*)

IGN : Institut Géographique National

INPN : Inventaire National du Patrimoine Naturel

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NCP : *Nature's Contributions to People*

NDVI : indice différentiel normalisé de végétation (*Normalized Difference Vegetation Index*)

OGM : Observatoire des Galliformes de Montagne

ONCFS : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

ORCHAMP : Observatoire des Relations Climat-Homme-milieus Agro-sylvo-pastoraux du Massif alpin

RF : forêts aléatoires (*Random Forests*)

S2M : SAFRAN - SURFEX/ISBA-Crocus - MEPRA (chaîne de simulation climatique)

SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

SURFEX : SURFace EXternalisée (plateforme groupant des modèles de simulation climatique)

ISBA : Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère

MEPRA : Modèle Expert d'Aide à la Prévision du Risque d'Avalanche

TPI : *Topographic Position Index*

TSS : *True Skill Statistic*

TWI : *Topographic Wetness Index*

ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

Introduction

Contexte général

Les écosystèmes montagnards rendent de nombreux services, à la fois des services de support, de régulation, d’approvisionnement et culturels (Millennium Ecosystem Assessment (Program) 2005). De par la variété de conditions en montagne (climatiques, topographiques, édaphiques), les milieux y sont très diversifiés tout comme les espèces qu’ils hébergent. Parmi les milieux et espèces phares, saxifrages et chamois préfèrent les milieux rocheux, myrtilles et genévriers forment des landes appréciées par le tétras-lyre, en mosaïque avec des pelouses occupées par les marmottes, et les sous-bois de mélèzes et forêts mixtes peuvent héberger de nombreuses espèces d’orchidées. Cette biodiversité riche est un atout pour les activités récréatives, très présentes dans les espaces montagnards accessibles. En été, une autre activité humaine non négligeable est le pastoralisme, qui utilise ces milieux et les façonne (Union mondiale pour la nature, Comité français 2014). Le contexte climatique peut y être considéré comme difficile, notamment l’hiver avec la présence de neige et des températures faibles, mais ces conditions deviennent des atouts pour les activités récréatives hivernales. Toutes ces activités sont centrales pour la dynamique socio-économique des territoires de montagne. Dans un contexte de changement climatique, les évolutions sont plus rapides en montagne qu’ailleurs (Beniston 2003), et il est nécessaire d’anticiper pour s’adapter à ces modifications. Cela passe par une meilleure compréhension des liens entre la dynamique des écosystèmes, les activités ou usages qu’ils supportent et leur coexistence.

Etat de l’art

Différentes approches sont mises en place pour étudier les écosystèmes et les usages par les humains (Figure 1).

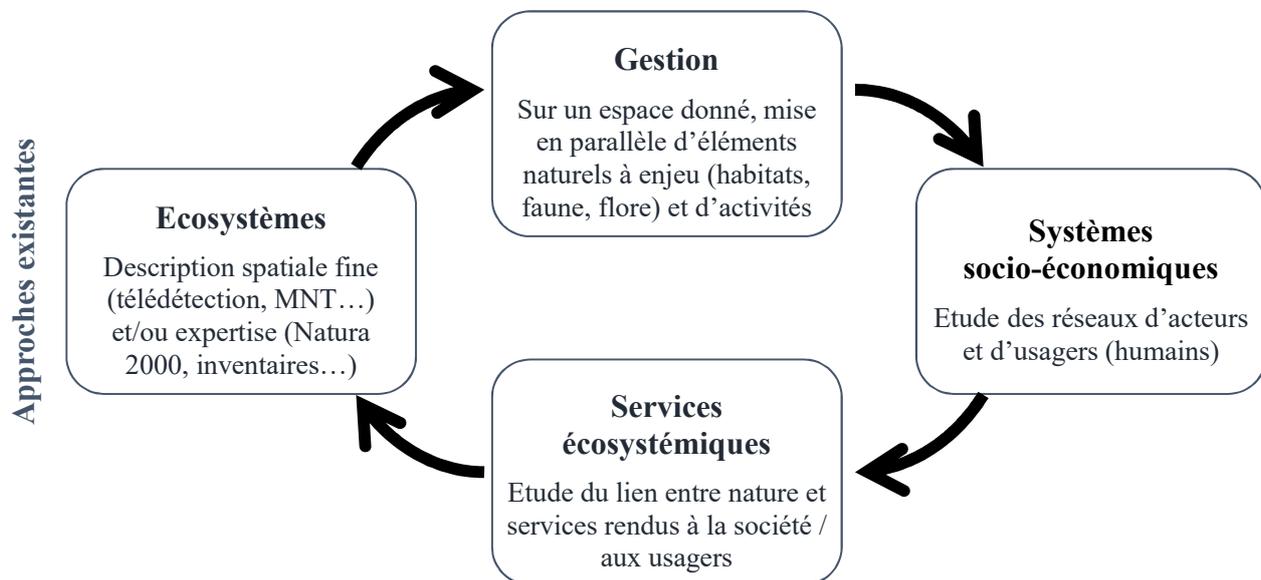


Figure 1 : Approches existantes pour caractériser les écosystèmes et usages

Leur mise en parallèle est souvent difficile, du fait de discordances spatiales : pour l’approche « écosystèmes », des outils permettent d’avoir une caractérisation à fine résolution, cohérente avec les variations très locales des caractéristiques des milieux, alors que pour l’approche « systèmes socio-économiques », qui étudie des territoires plus ou moins vastes, l’attache spatiale n’est pas toujours présente. Les approches « gestion » et « services écosystémiques » ou « *Nature’s Contributions to People* » cherchent à relier les écosystèmes à leurs usages humains, mais sont peu intégratrices : ce sont des visions anthropocentrées qui opposent Homme et Nature alors que l’Homme

fait partie intégrante de la Nature (Pinton, 2018, présentation à AgroParisTech Nancy), au même titre que les autres usagers des milieux comme les animaux. L'approche « gestion » superpose des cartographies d'activités à celles d'éléments naturels à enjeux, afin de visualiser leur compatibilité ou non et de gérer l'espace en conséquence : elle a rarement pour objectif d'être fonctionnelle. Elle est de plus focalisée sur des éléments à enjeux, sans forcément intégrer l'écosystème dans son ensemble. Par ailleurs, ces deux approches entre milieux et systèmes socio-économiques sont souvent basées sur l'expertise, tout comme les inventaires dans les approches « écosystèmes », bien que des approches plus fonctionnelles existent (Lavorel et al. 2011). Dans ce cas, le lien fonctionnel entre services et écosystèmes est caractérisé précisément pour les services de production, alors que pour les autres services, le lien est souvent hypothétique, ce qui aboutit à des services potentiels et pas forcément effectifs.

Ambition

Dans cette étude, nous essayons de développer un nouveau cadre d'analyse permettant de mieux intégrer les écosystèmes et les sociétés humaines, avec une échelle spatiale commune et un positionnement au même niveau des humains et des animaux, tous considérés comme usagers des milieux. Il y donc un changement de perspective qui sépare le socio-écosystème en deux, mais n'oppose pas humains et nature. D'une part les éléments structurants et peu ou pas mobiles constituent le milieu. Les animaux plus gros (y compris les humains) pratiquent différentes activités au sein de ce milieu et l'utilisent donc, d'une manière ou d'une autre : ces usages forment la seconde part du système étudié. Les usages, pour les humains, peuvent être rattachés en grande partie aux services écosystémiques. L'analyse a également pour objectif d'explorer différentes hypothèses quant aux liens fonctionnels entre milieux et usages, afin de visualiser les concordances spatiales et saisonnières de ces derniers.

Problématiques

En appliquant ce nouveau cadre d'analyse à l'unité pastorale de montagne du Chardonnet, dans la vallée de la Clarée (Hautes-Alpes), nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

- (1) Qu'est-ce qui distingue les différents milieux de l'unité pastorale étudiée, d'un point de vue fonctionnel, en été et en hiver ?
- (2) De quoi dépend chaque activité / usage, en termes de caractéristiques fonctionnelles du milieu ?
- (3) Quelles relations entre activités / usages (évitements ou co-utilisations), se retrouvent sur l'unité pastorale étudiée, en hiver et en été ?

Résumé de l'approche développée

A partir d'une base de données où chaque unité spatiale élémentaire, ou pixel, est décrite par des caractéristiques fonctionnelles et en termes d'usages, la question (1) permet de dégager des groupes de pixels similaires, avec des analyses multivariées, et de voir si ce sont les mêmes groupes qui ressortent en hiver et en été. En superposant les données spatiales d'usage à l'analyse multivariée de la question (1), nous distinguons les caractéristiques principales du milieu associées à chaque usage : cette étape correspond à la question (2), où une « niche d'usage » est identifiée (Byczek et al. 2018). Ceci permet également de poser des hypothèses quant aux dépendances (et impacts potentiels) de ces usages par rapport aux écosystèmes et à leurs caractéristiques. Dans ces deux premières étapes, nous considérons seulement la contribution des écosystèmes aux bénéfices / services retirés par la société ou plus généralement la mégafaune. Cependant les services rendus par un écosystème et les différents usages qu'il supporte interagissent : les socio-écosystèmes sont des réseaux complexes, et non pas des systèmes binaires avec un milieu d'une part et des usagers d'autre part, sans lien au sein de chacune de ces parties. On parle de réseaux de services écosystémiques, avec des synergies, des antagonismes, et

des complémentarités à l'échelle du paysage (Lavorel et al. 2016). Il est donc intéressant de déterminer quels sont les éléments centraux dans le réseau socio-écosystémique, à la fois en termes d'activités / usages et de type de milieu. Ceci permet d'aborder la question (3) , avec l'analyse du réseau d'écosystèmes sur l'unité du Chardonnet. Les usages sont superposés, et les lieux d'interdépendances sont identifiés, que ce soit des interdépendances directes ou indirectes, estivales ou hivernales. Des zones « refuge » et des zones très multifonctionnelles, ainsi que leurs caractéristiques, peuvent alors être décrites.

1. Contexte de l'étude et présentation de la démarche

1.1. Présentation du site du Chardonnet

L'alpage du Chardonnet est situé dans la vallée de la Clarée, sur la commune de Névache au nord-est des Hautes-Alpes (05), à proximité de la frontière italienne (Figure 2). La délimitation du site d'étude suit les limites de l'unité pastorale du Chardonnet. C'est une unité pastorale de 1549 ha, dont la délimitation suit les limites naturelles formées par la Tête de la Cassille, la crête de Casse Blanche et le ruisseau de Roche Noire au nord, la rivière Clarée au nord-est, le pic Ombière, la Roche du Monétier et la crête du Diable au sud, et la crête du Chardonnet à l'ouest et au sud-ouest. La zone d'étude s'étage de 1813 m au Pont de la Souchère à 3069 m d'altitude, à la Tête de la Cassille. Une crête la traverse du nord-nord-ouest au sud-sud-est, avec la crête du Queyrellin et la Grande Manche, séparées par les ruisseaux du Chardonnet et du Raisin qui coulent d'ouest en est, se rejoignent puis se jettent dans la Clarée.

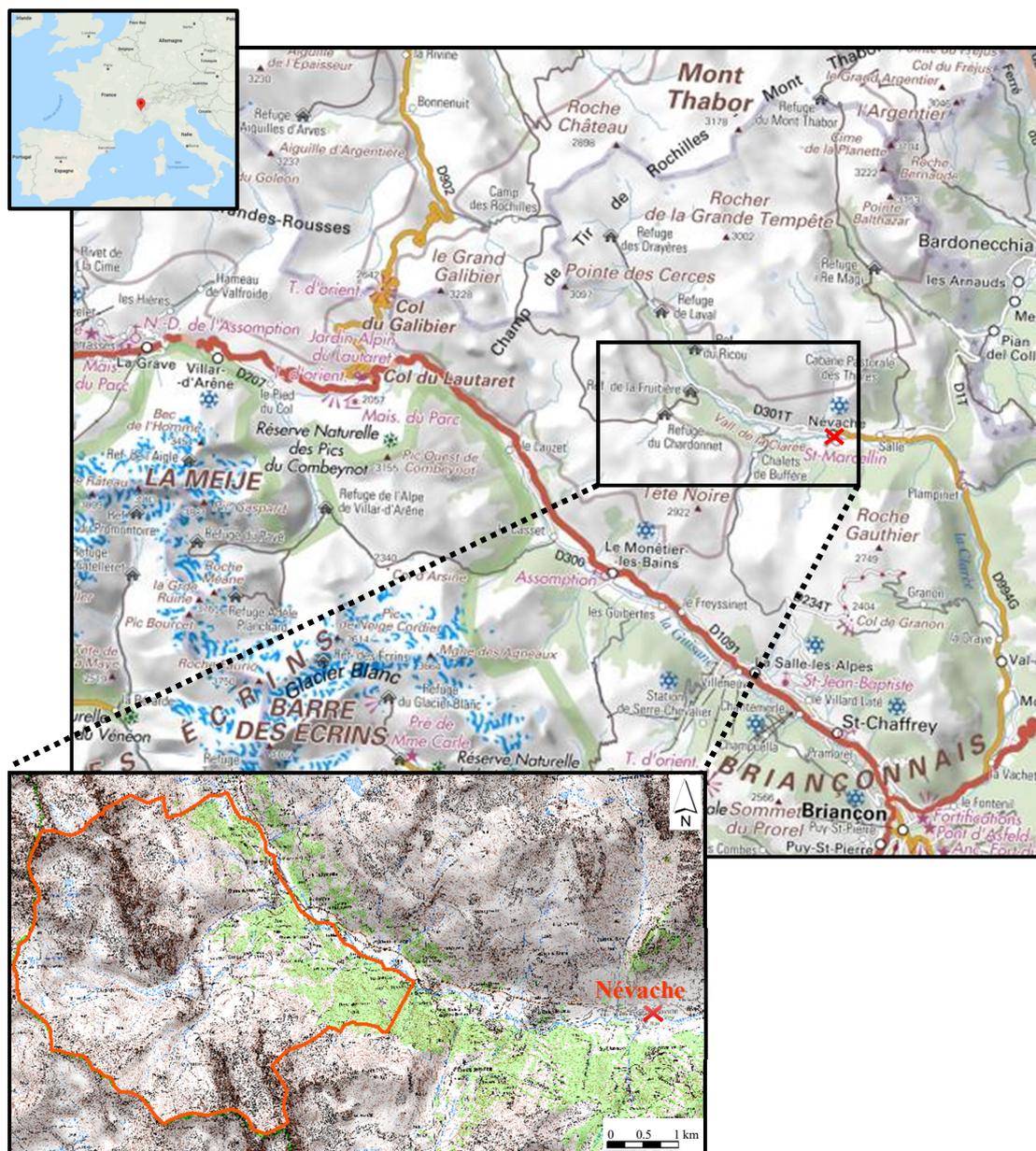


Figure 2 : Localisation de l'unité pastorale du Chardonnet (délimitation en rouge)

Une grande partie de la surface du site est minérale, avec des parois et des éboulis, siliceux ou calcaires : la présence de ces deux natures de roche est assez rare dans le secteur. On y trouve une végétation très spécialisée, adaptée au manque de sol et à la mobilité du substrat. Le reste de la partie haute est couvert de pelouses et de landes. La partie basse, à l'est, est forestière, avec des forêts ouvertes de conifères ou des mélézins, parfois en mosaïque avec les landes et pelouses. Des milieux humides sont également présents, le long des ruisseaux et en bordure des lacs (lac de la Mine, lac du Chardonnet, lacs de la Casse Blanche). Une zone tourbeuse remarquable, au bas de la crête de Queyrellin, accueille de nombreuses espèces rares et protégées (IGN, 2014 - BD Forêt version 2 ; Vivat et al., 2014 - Tome 1 du DOCOB). Quelques zones artificialisées se retrouvent sur l'unité pastorale, avec le refuge, la cabane du berger, et les anciens chalets d'estive du Queyrellin et de Laroux, certains étant devenus des résidences secondaires (Tableau 1 et Annexe 0 : Atlas cartographique et photographique).

Tableau 1 : Types de milieux présents sur le site d'étude (source : DOCOB)

Type de milieu dominant	Codes Natura 2000	Surface correspondante sur l'unité pastorale	Pourcentage surfacique
Eboulis	8110 – 8120	513,6 ha	33,2 %
Pelouses	6230 – 6170 – 6150	378,3 ha	24,4 %
Forêts	9420	242,4 ha	15,7 %
Parois rocheuses	8210 – 8220	205,0 ha	13,2 %
Landes	4060	175,2 ha	11,3 %
Tourbières	7230 – 7140	20,1 ha	1,3 %
Prairies de fauche	6520	5,8 ha	0,4 %
Végétation ripicole, des bords de cours d'eau	3220 – 3240	3,5 ha	0,2 %
Eaux stagnantes	3130	3,0 ha	0,2 %
Zones artificialisées	-	1,3 ha	0,1 %
Mégaphorbiaies	6430	0,2 ha	0,01 %
	Total	1548,4 ha	

Cette diversité de milieux et la faune remarquable qu'ils abritent sont reconnues pour la vallée de la Clarée et les vallées voisines (Vallée Etroite et vallée de la Guisane) par la classification en site Natura 2000. Trois zonages ZNIEFF sont également présents et comprennent tout ou partie du site d'étude (Annexe 1).

Les richesses naturelles attirent de nombreux touristes et sont donc au cœur de l'activité économique. Bien que le tourisme reste extensif, la fréquentation de la vallée de la Clarée est en augmentation, notamment l'été où l'esthétisme des paysages est un point fort sur lequel se base la communication auprès des visiteurs (*source : entretien auprès de l'office de tourisme de Névalche, réalisé par Isabelle Boulangeat – 2018*). L'aspect coloré est un atout qui attire et alimente les photographies de communication, car la Clarée est connue pour son ciel très bleu, des couleurs magnifiques au printemps à la fonte des neiges, une floraison importante de la végétation au printemps, de nombreux lacs, et les couleurs chatoyantes des mélézins à l'automne. Ana, l'héroïne de *Mon cœur contre la terre* d'Eric de Kermel, parle d'ailleurs d'un ciel « bleu à en rendre jaloux Majorelle », et évoque les paysages hivernaux de la Clarée en disant qu'« en hiver, tout n'est que bleu et blanc, chacune des deux couleurs dans sa teinte la plus éclatante, lumineuse et brillante : jamais un marchand de peinture ne fabriquera un bleu 'Hautes-Alpes' ou un blanc 'Neige de la Clarée' » !

De nombreux sentiers parcourent la vallée, dont le sentier de Grande Randonnée Tour du Mont Thabor (GR 57) qui traverse la partie haute de la zone d'étude, l'alpage du Chardonnet. Celui-ci est accessible relativement facilement, et le refuge du Chardonnet ouvert en hiver et en été, est un bon point de chute pour les skieurs, les cyclistes à VTT et les randonneurs, après environ 400 m de dénivelé positif depuis le fond de la vallée. D'autres refuges (Ricou, les Drayères, Laval et Buffère) sont présents dans la vallée et permettent d'effectuer des traversées de refuge en refuge. D'anciens chalets d'estive ont été transformés en résidences secondaires (chalets de Laroux et du Queyrellin pour ceux qui font partie de la zone d'étude) et sont des éléments supplémentaires associés à une présence humaine importante. Ces caractéristiques font que la fréquentation diffère de sites plus alpins (dans le sens « de haute montagne ») comme le Parc National des Ecrins, à quelques kilomètres au sud-ouest du Chardonnet : le public du Chardonnet est potentiellement plus familial et présent toute l'année. Ce dernier point est intéressant pour l'étude, pour mettre en parallèle les usages estivaux et hivernaux du site.

La plupart des lacs de la Clarée, les torrents et la rivière sont des parcours de pêche, mais les surfaces d'eau libre présentes sur la zone d'étude (lac de la Mine, lacs de la Casse Blanche, lac du Chardonnet, ruisseaux du Chardonnet et du Raisin) ne font pas partie de ces parcours (Carte interactive de localisation des zones de pêche, <https://map.geopeche.com/05/#13;6.542528;45.024497>). La chasse est aussi pratiquée en Clarée, avec des prélèvements de mouflon, chamois, bouquetin, chevreuil, cerf, lièvre variable, tétras-lyre, perdrix bartavelle et lagopède, en automne et début d'hiver (de mi-septembre à mi-janvier).

Tourisme et loisirs ne sont pas les seules activités humaines sur la zone d'étude : l'unité pastorale est exploitée au travers d'une convention pluriannuelle de pâturage, par un troupeau ovin présent environ 4 mois, de mi-juin à mi-octobre. Le troupeau provient d'exploitations du Sud de la France et comprend autour de 1700 brebis, ainsi qu'une vingtaine de chèvres (Vivat et al., 2014 - Tome 1 du DOCOB).

L'exploitation forestière y est limitée : la production ligneuse est relativement faible, les parcelles privées sont très morcelées, et pour les parcelles publiques, qui font partie de la forêt communale de Névache, les orientations de gestion retenues visent surtout le maintien des paysages et l'accueil du public.

La partie haute de la zone (au-delà de la limite supérieure de la forêt) fait partie du champ de tir des Rochilles – Mont Thabor et est donc utilisée par les militaires, pour s'entraîner. Les périodes d'entraînement sont limitées dans le temps, restreintes à deux semaines consécutives maximum au printemps et à l'automne, où les usages touristiques et pastoraux n'entrent pas en conflit avec les exercices de tir. Cela laisse néanmoins des débris métalliques et cause des dommages aux points d'impact des obus (Vivat et al., 2014 - Tome 1 du DOCOB).

Du point de vue scientifique, l'alpage du Chardonnet est situé à proximité du jardin Alpin du Lautaret et de sa station de recherche, et est équipé d'un gradient ORCHAMP (Observatoire des Relations Climat-Homme-milieux Agro-sylvo-pastoraux du Massif alPin). Ce dispositif est un observatoire pluridisciplinaire de suivi à long terme des écosystèmes, paysages et territoires, visant à mieux comprendre les dynamiques couplées entre climat, biodiversité et utilisations des terres. Des placettes sont disséminées en gradients altitudinaux dans vingt-quatre bassins versants des Alpes, et des protocoles de suivi de la météo, de la végétation, de la faune et du sol sont mis en place (ORCHAMP-OSUG, <https://orchamp.osug.fr/sites/18#>). Bien que seulement cinq placettes soient situées sur la zone d'étude, les relevés de végétation ainsi que les photographies issues des appareils *time-lapses* ont pu enrichir l'analyse.

1.2. Démarche mise en place

1.2.1. Une approche fonctionnelle originale pour qualifier les milieux et déterminer leurs liens avec les usages

La démarche de cette étude est différente de celle rencontrée dans de nombreux articles scientifiques (Lavorel et al. 2011 ; Schirpke et al. 2018 ; Burkhard et al. 2012 ; Willemen et al. 2008). Plutôt que de présupposer que telle ou telle caractéristique du milieu affecte la fourniture de tel ou tel service, et donc d'extrapoler la répartition spatiale des services écosystémiques potentiels à partir d'une cartographie des caractéristiques du milieu, ici nous mettons en parallèle les caractéristiques du milieu avec les usages et services écosystémiques pour en déduire les liens marquants entre les deux (Figure 3). Ceci permet donc de poser des hypothèses quant au lien fonctionnel entre caractéristiques du milieu et usage, lien assez bien documenté pour les usages liés aux services écosystémiques de production mais peu pour les autres usages.

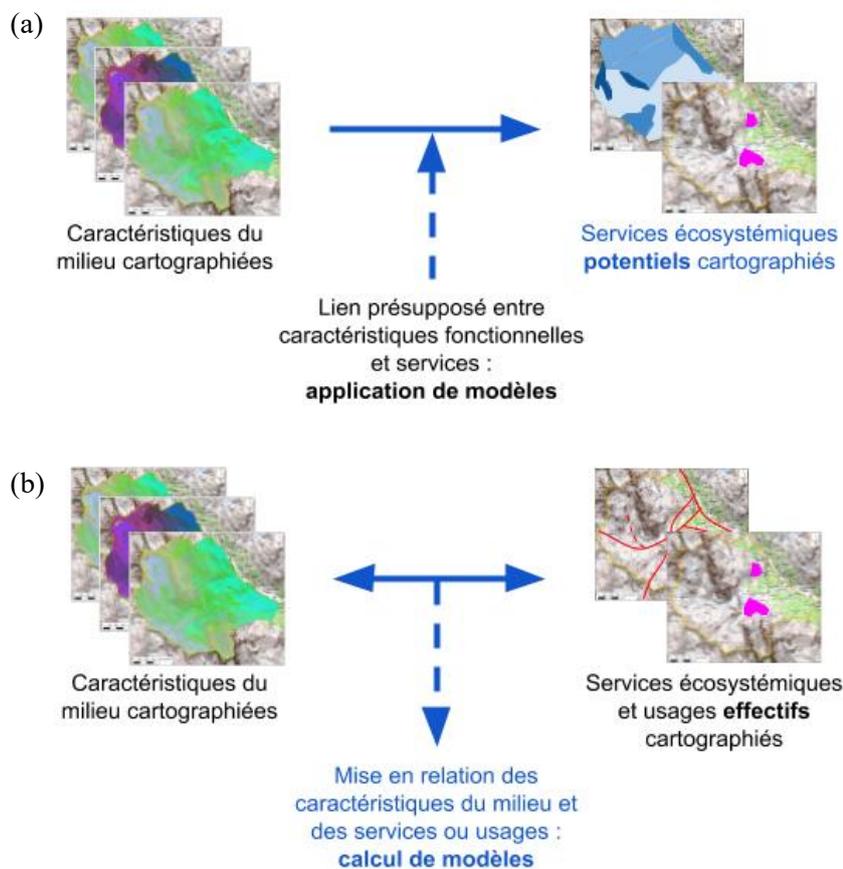


Figure 3 : Parallèle entre des démarches de cartographie de services écosystémiques fréquentes (a) et la démarche mise en place dans cette étude (b). Le texte en bleu met en avant la finalité de chacune des deux démarches.

Ainsi l'approche se veut fonctionnelle, c'est-à-dire liée aux processus ayant lieu au sein du socio-écosystème, processus qui font qu'un service est rendu ou qu'un usage est présent seulement dans certaines zones. Elle permet donc d'appuyer et documenter le « dire d'expert », où les liens fonctionnels sont implicites. La meilleure compréhension de la chaîne « Milieux → Fonctions → Services écosystémiques et usages » peut aussi permettre de prédire la présence / absence d'usages dans le temps et dans l'espace.

Pour développer cette approche, nous nous inspirons de la biogéographie, où l'on cherche à comprendre la présence / absence d'une espèce à partir des caractéristiques des milieux : les niches d'espèces sont ainsi définies comme les conditions nécessaires au maintien des populations (Hutchinson 1957). Pour aborder les liens fonctionnels entre présence / absence d'un usage et caractéristiques des milieux, nous proposons donc de parler de niches d'usages. Les termes et méthodes qui se rattachent au concept de niches d'espèces sont réemployés dans cette étude. Nous développons ainsi des modèles de distribution spatiale des usages, pour caractériser les niches et tester ou proposer des hypothèses de mécanismes sous-jacents à la relation entre usages et milieux. Nous faisons référence aux mécanismes de coexistence pour étudier l'articulation des usages entre eux, au concept d'exclusion compétitive pour parler des effets d'évitement.

1.2.2. Une analyse spatiale des milieux et des usages à fine résolution

Pour étudier la distribution spatiale des usages au sein de l'unité pastorale du Chardonnet (15.5 km²), une résolution relativement fine est nécessaire. Nous choisissons une grille de pixels de 25 m, résolution d'un ordre de grandeur cohérent pour la caractérisation écologique des milieux. En effet, les suivis d'habitat sont en général réalisés à une résolution entre 5 m et 50 m, et les échantillonnages de communautés végétales, à 10 ou 20 m. Cette résolution nous paraît donc intermédiaire, prenant en compte une bonne partie des forts changements topographiques dans les zones de montagne, même si la microtopographie peut produire encore de l'hétérogénéité à l'intérieur d'un pixel. Des valeurs ou indices sont attribuées à chacun des pixels, à partir de données cartographiées, qui correspondent à des caractéristiques fonctionnelles du milieu et aux usages. Ces données sont uniquement extraites de bases de données existantes ou recalculées. Des précisions concernant les usages ont été obtenues auprès des utilisateurs eux-mêmes (berger notamment).

L'utilisation d'une grille à 25 m pose le défi de la disponibilité des données à cette résolution. C'est néanmoins une échelle intéressante pour comprendre dans le détail les liens entre caractéristiques du milieu et usages ou services écosystémiques. Certaines études et cartographies sont réalisées à une résolution plus large, avec pour unités spatiales les communes (comme dans Schirpke et al., 2018, pour les services écosystémiques culturels et les usages récréatifs) ou les villages et leurs alentours (Schmitz et al., 2018, pour une typologie des socio-écosystèmes liés à des usages agricoles et touristiques), mais les variations locales des milieux sont moyennées, et cela ne permet donc pas de dégager des liens fonctionnels entre usages ou services, et caractéristiques du milieu. De nombreuses cartographies des services écosystémiques sont basées sur les catégories de couvert et d'occupation des sols : les bases de données regroupant ces informations sont souvent réalisées sur de grandes surfaces, et les unités cartographiques sont donc généralement des pixels de 100 m, 250 m ou 1 km (Schirpke et al. 2013 ; Willemen et al. 2008 ; Burkhard et al. 2012). *A contrario*, des études sur les bouquets de services écosystémiques sont effectuées à cette résolution (pixels de 20 x 20 m), mais sans cartographier l'usage réel : c'est le cas pour Lavorel et al., 2011, où les services écosystémiques potentiels sont extrapolés à partir des caractéristiques des écosystèmes. Par ailleurs cette étude se focalise sur les pelouses et prairies de montagne, où se concentrent les usages pastoraux, sans prendre en compte l'ensemble du paysage : par exemple les pierriers sont exclus. Les sites Natura 2000 présentent l'avantage de regrouper de nombreuses informations cartographiques, qui peuvent être raffinées à l'aide d'autres données pour atteindre la résolution de 25 m.

1.2.3. Des usages par les humains mais aussi par les animaux

Nature et Homme sont souvent opposés dans une vision binaire du monde (Pinton, 2018, présentation à AgroParisTech Nancy). Or l'Homme fait partie intégrante des écosystèmes : nous proposons comme alternative ici d'utiliser le diptyque milieux-usages, intégrant les usages humains et animaux. Ces

derniers sont groupés au travers des usages par la faune. Il est impossible d'inclure la faune dans sa totalité (i.e. de la microfaune aux plus grands mammifères) et, au vu des problématiques de l'étude, c'est la catégorie « mégafaune » qui serait la plus pertinente. Cette dernière correspond aux « animaux suffisamment grands pour être visibles à l'œil nu » (définition du dictionnaire OXFORD) et, dans le domaine de la recherche scientifique, elle est souvent définie par des critères de masse des individus adultes (Martin 1995). Une définition affinée du point de vue trophique est également rencontrée (Malhi et al. 2016). Ces définitions incluent l'Homme. Ici la question trophique n'est pas centrale : c'est la spatialisation des usages qui est au cœur de l'étude. Nous nous concentrons donc sur une sélection de la mégafaune par rapport à l'espace qui est utilisé, relativement à la surface de la zone d'étude et relativement à la surface d'une unité spatiale (pixel).

La fourchette choisie pour sélectionner les usages par rapport à leur emprise spatiale va de un centième à dix fois la surface de la zone d'étude. L'unité pastorale considérée couvre un peu plus de 1500 ha, et est divisée en environ 25 000 pixels de 25 m de côté (soit des pixels de 625 m²). Pour la surface d'usage potentiel, la limite inférieure choisie correspond donc à 250 pixels soit 15.6 ha (1 % de la zone d'étude) ; la limite supérieure est de 15 000 ha (10 fois la surface de la zone d'étude). Ces seuils se réfèrent à des usages continus dans l'espace : un oiseau qui utilise l'équivalent de 250 pixels en volant d'un groupe de pixels à un autre groupe n'entre donc pas dans les usagers étudiés. D'autres usagers sont éliminés, comme le loup, pour lequel la zone d'étude représente moins de 10 % du domaine vital (ONCFS, <http://www.oncfs.gouv.fr/>), ou les marmottes, qui utilisent moins de 1 % de la zone d'étude (domaine vital de 0.3 à 1.5 ha au maximum (Jost, Jost 2004)). La disponibilité des données restreint aussi les usages considérés. Sont inclus les mammifères et galliformes suivants : chamois (*Rupicapra rupicapra rupicapra*), bouquetin des Alpes (*Capra ibex ibex*), mouflon méditerranéen (*Ovis gmelini musimon x Ovis sp.*), cerf élaphe (*Cervus elaphus*), tétras-lyre (*Tetrao tetrix*), lagopède alpin (*Lagopus muta*), perdrix bartavelle (*Alectoris graeca*). Les usages humains entrent également dans cette fourchette. En effet, le troupeau reste sur l'unité pastorale du Chardonnet (donc sur la zone d'étude) durant toute la saison estivale, et pour les usages récréatifs, on peut estimer qu'une randonnée pédestre ou à ski de 10 à 30 km traverse 300 à 1200 pixels. La pratique du VTT est considérée via la randonnée pédestre, car les cyclistes circulent principalement sur les mêmes sentiers que les randonneurs. La chasse n'est pas étudiée car limitée dans le temps (uniquement à l'automne et en début d'hiver), de même que la sylviculture (la forêt étant de plus en plus productive) et l'usage militaire (les seuils spatiaux sont un autre critère qui élimine cet usage de l'étude). Les usages considérés sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Usages par la mégafaune présente sur la zone d'étude et surface potentielle associée à l'usage. En vert les usages retenus, en orange les usages non considérés du fait des seuils surfaciques, en gris les usages non considérés pour d'autres raisons (manque de données pour le lièvre variable et le chevreuil) L'usage pastoral via les couchades est considéré dans l'analyse malgré le seuil surfacique, du fait de la concentration et de l'intensité de l'usage sur une surface relativement restreinte. Sources : ONCFS, <http://www.oncfs.gouv.fr/> ; Conservatoire Rhône-Alpes des espaces naturels et al., 2010 ; Belleau et al., 2018.

Usage	Emprise spatiale correspondante	Pourcentage surfacique de la zone d'étude	Nombre de pixels correspondant	
Usages animaux potentiels	Espace vital du Chamois	Dizaine à centaine d'hectares	0.5 - 10 %	125 – 2 500
	Espace vital du Bouquetin des Alpes	500 à 2 000 hectares pour un troupeau	30 – 140 %	7 500 – 35 000
	Espace vital du Mouflon méditerranéen	500 à 1500 hectares	30 – 100 %	7 500 – 25 000
	Espace vital du Cerf élaphe	500 à 2 000 hectares pour une biche, quelques milliers pour un	30 – 300 %	7 500 – 75 000

		mâle		
	Espace vital du Chevreuil	20 à 60 hectares	1 – 4 %	250 – 1000
	Espace vital du Loup	~ 20 000 hectares pour une meute	~ 1 400 %	~ 350 000
	Espace vital de la Marmotte	0,3 à 4 hectares	0.02 – 0.3 %	5 – 75
	Espace vital du Lièvre variable	50 à 200 hectares	3 – 15 %	750 – 3 750
	Espace vital du Tétrasyre	50 à 400 hectares	3 – 30 %	750 – 7 500
	Zone de nidification du Tétrasyre	Vingtaine d'hectares	~ 1 %	~ 250
	Zone d'hivernage du Tétrasyre	Dizaine à cinquantaine d'hectares	0.5 – 5 %	125 – 1200
	Espace vital de la Perdrix bartavelle	120 à 340 hectares	8 – 25 %	2 000 – 6250
	Zone de nidification de la Perdrix bartavelle	Quelques hectares à quelques dizaines d'hectares	0.1 – 3 %	25 – 750
	Espace vital du Lagopède alpin	Centaine d'hectares	~ 10 %	~ 2500
	Zone de nidification du Lagopède alpin	Quinzaine d'hectares	~ 1 %	~ 250
Usage pastoral	Zone de pâture du troupeau (1 500 à 2 000 têtes)	Unité pastorale du Chardonnet (1 000 – 1 500 hectares)	70 – 100 %	17 500 – 25 000
	Zones de couchades	Entre 3 et 5 hectares, divisés en plusieurs parcs	0.2 – 0.4 %	50 – 100
Usages récréatifs	Randonnée pédestre (ou en raquettes)	Environ 20 kilomètres de chemins référencés sur la zone d'étude : 300 à 1 200 pixels	1 – 5 %	300 – 1 200
	Randonnée à ski	Environ 40 kilomètres d'itinéraires référencés sur la zone d'étude : 800 à 2 000 pixels	3 – 10 %	800 – 2 000
	Usage militaire : champ de tir des Rochilles	Environ 20 000 hectares	~ 1 400 %	~ 350 000

1.2.4. Des caractéristiques fonctionnelles organisées en dimensions

Pour les modèles dynamiques de biodiversité (Boulangéat et al. 2012) ou l'analyse de la répartition des services écosystémiques à l'échelle d'un paysage (Lavorel et al. 2011), les auteurs s'attachent aux traits fonctionnels de plantes. Dans le premier cas, ils étudient plus spécifiquement les traits liés aux mécanismes d'assemblage des communautés et aux réponses individuelles des végétaux aux changements environnementaux, alors que dans le second cas, ce sont ceux liés aux valeurs culturelles, agronomiques, à la pollinisation ou au stockage de carbone dans les sols. Dans la même optique et au

vu des questions présentées en Introduction, nous nous attachons aux caractéristiques fonctionnelles des milieux, dans l'idée de former des groupes fonctionnels, i.e. des groupes de milieux similaires, ayant des effets fonctionnels semblables sur les usages (adapté de Lavorel, Díaz, et al., 2007 ; Gitay, Noble, 1997). Au premier abord, les traits fonctionnels de la végétation seuls ne semblent pas suffisants pour expliquer la variabilité spatiale de tous les usages et services écosystémiques, c'est pourquoi les caractéristiques fonctionnelles des milieux utilisées dans l'étude sont plus larges.

Afin d'ordonner ces caractéristiques fonctionnelles, des dimensions sont dégagées. Lorsqu'ils proposent de construire un « tableau périodique des niches », à partir des traits fonctionnels et de performance des organismes, Winemiller et al., 2015 considèrent que quatre à huit dimensions sont optimales. En faisant le parallèle entre les niches d'espèces et les niches d'usages, nous nous posons la question de « qu'est-ce qui explique la présence d'un usage à un endroit donné ? » et dégageons sept dimensions qui permettent d'y répondre et de classer ainsi les caractéristiques des milieux (Figure 4). Comme pour les niches d'espèces, nous cherchons à caractériser les ressources et les conditions bio-géophysiques, tout en prenant en compte les déplacements dans l'espace (dispersion) (Soberón 2007). Pour ce qui est de la ressource, nous nous inspirons des *Nature's Contributions to People* (NCP) et distinguons les ressources consommables et non consommables (IPBES 2019). Pour l'accès nous considérons les facteurs facilitant le déplacement des usagers. L'accessibilité peut aussi être affectée par des infrastructures humaines, lesquelles jouent également sur les usages via d'autres mécanismes explicités par Anderies et al., 2004. Pour les conditions bio-géophysiques, nous ajoutons un aspect de contexte spatial, permettant d'inclure une vision à plus large échelle du paysage. Les sept dimensions obtenues sont détaillées davantage ci-après.

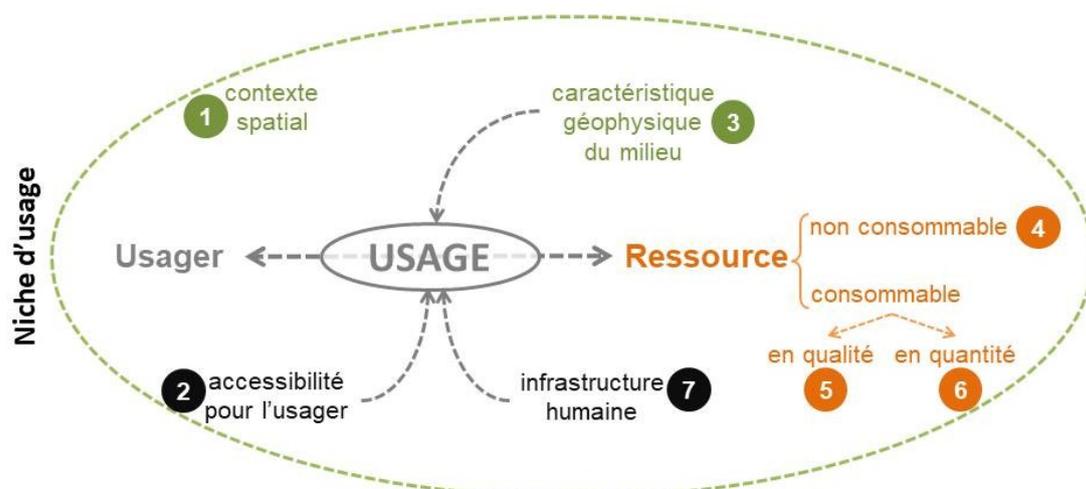


Figure 4 : Présentation des sept dimensions cadrant la description fonctionnelle des milieux. Ces sept dimensions sont liées à la question « qu'est-ce qui explique la présence d'un usage à un endroit donné ? » : en vert les conditions environnementales, en orange ce qui se rattache aux ressources, en noir ce qui se rattache à l'accessibilité pour les usagers, via leurs déplacements ou des infrastructures spécifiques.

Dimension 1 : Contexte spatial du pixel

Par contexte spatial nous entendons l'entourage du pixel étudié. L'entourage peut être proche ou plus lointain, et concerner des aspects fonctionnels écologiquement parlant (connexion entre milieux, aspect mosaïque et diversité locale des habitats) ou non (situation par rapport à des éléments clé du paysage qui attirent le regard).

Dimension 2 : Accessibilité du pixel pour l'utilisateur

Tous les usagers considérés sont mobiles, mais ce n'est pas pour autant que tous les points de la zone d'étude sont accessibles : des obstacles peuvent limiter l'accès aux pixels et donc l'usage. Les

obstacles sont liés à la topographie (ex. falaise), aux zones d'eau libre, au type de végétation ou encore à l'enneigement, qui rend les déplacements plus coûteux en énergie.

Dimension 3 : Caractéristiques géophysiques du pixel

Les caractéristiques géophysiques des pixels comprennent les conditions climatiques, topographiques et édaphiques. Ce sont des caractéristiques couramment utilisées en écologie pour expliquer la présence des espèces, mais qui pourraient aussi influencer les usages humains, par exemple l'enneigement pour la pratique du ski.

Dimension 4 : Ressources non consommables présentes sur le pixel (structure)

La dimension 4 s'oppose aux dimensions 5 et 6 dans le sens où elle correspond à des ressources non consommables, c'est-à-dire des ressources qui ne sont pas détruites par leur usage. Ces ressources non consommables présentes sur le pixel sont notamment celles liées à la végétation, qui fournit ombre et fraîcheur (en présence d'une canopée développée), abri (ex. buissons et landines protecteurs), ou encore qualité esthétique (notamment lors des floraisons). Pour certaines espèces, l'abri n'est pas lié à la végétation mais plutôt à des éboulis ou des parois, où elles sont moins atteignables.

Dimension 5 et dimension 6 : Qualité et quantité des ressources consommables présentes sur le pixel, respectivement

Les ressources consommables sont donc celles qui sont détruites lors de leur usage, par opposition aux ressources non consommables de la dimension 4. Nous distinguons leur qualité et leur quantité qui peuvent avoir différents impacts sur les usages potentiels. Ces ressources consommables font écho aux services écosystémiques d'approvisionnement, qui regroupent notamment la nourriture, les combustibles, le bois, ou l'eau (Millennium Ecosystem Assessment (Program) 2005). Les ressources consommables concernées en montagne sont surtout les ressources alimentaires, le bois, et les ressources en eau associées à l'usage pastoral et aux usages animaux.

Dimension 7 : Infrastructures associées au pixel

L'idée d'infrastructure fait écho à la vision schématique des socio-écosystèmes présentée dans l'article d'Anderies et al., 2004, où les infrastructures sont des éléments essentiels qui affectent les utilisateurs de ressource, la ressource elle-même, et le lien entre la ressource et l'utilisateur. Les infrastructures peuvent être des aménagements (*hard infrastructures*, ex. routes, bâtiments) ou des éléments administratifs (*soft infrastructures*, ex. structure de protection, division cadastrale).

2. Construction de la base de données

Sur la zone d'étude, de nombreuses données sont mobilisables. En effet, les Alpes présentent des sites et observatoires pour étudier et suivre le milieu montagnard, d'un point de vue écologique ou d'un point de vue socio-économique. Par ailleurs, la présence d'un site Natura 2000 est associée à des études et suivis écologiques, sources de données supplémentaires. Ces informations doivent cependant être complétées pour une étude fonctionnelle à fine résolution spatiale.

L'étude présentée ici concerne une unité pastorale divisée en pixels de 25 m de côté, soit 24791 pixels, chacun d'entre eux étant caractérisé pour la saison estivale et pour la saison hivernale. La base de données construite comprend donc 49582 lignes et autant de colonnes que de caractéristiques fonctionnelles et de variables d'usage.

2.1. Approche saisonnière

Un des objectifs de l'étude est de comparer les milieux et leurs usages entre l'été et l'hiver. Plutôt que de se baser sur les saisons calendaires, nous avons défini des périodes de telle sorte que les variables soient homogènes et représentatives des pixels pour la saison considérée. En effet à l'intersaison les différenciations altitudinales associées au manteau neigeux (fonte de la neige et premières chutes) sont importantes, et les conditions peuvent varier fortement d'une année sur l'autre. Cette variabilité interannuelle des conditions se répercute aussi sur les usages. Ainsi dans cette étude, l'hiver correspond à la période du 1^{er} janvier au 31 mars, et l'été du 17 juin au 14 septembre, soit 90 jours pour chacune des deux saisons. Ces dates sont cohérentes avec les observations d'enneigement des appareils photographiques automatisés (*time-lapses*) du dispositif ORCHAMP. Elles cadrent également avec la saisonnalité des usages récréatifs et pastoraux.

Certaines variables représentent donc les pixels indépendamment de la saison (ex. les variables topographiques), alors que d'autres sont associées à une saison en particulier (ex. température et enneigement). C'est le cas pour les variables associées aux caractéristiques fonctionnelles mais aussi pour celles associées aux usages : les données disponibles pour les domaines vitaux des animaux n'intègrent pas d'information saisonnière, alors que les usages récréatifs peuvent être distingués entre l'hiver (ex. parcours de ski) et l'été (ex. parcours de randonnée pédestre).

2.2. Caractéristiques fonctionnelles des milieux

2.2.1. Sept dimensions déclinées en caractéristiques fonctionnelles décrivant les milieux

Afin de donner un cadre à l'analyse, sept dimensions sont dégagées. Chacune de ces dimensions est ensuite déclinée en caractéristiques fonctionnelles, calculées à partir des données existantes ou associées à des proxies lorsque les informations directes ne sont pas disponibles (Tableau 3). Du fait de l'utilisation de proxies, certaines variables apparaissent dans plusieurs dimensions (comme dans l'approche de Winemiller et al., 2015). Chaque variable décrit les pixels pour une saison en particulier (voir le paragraphe 2.1. – dans ce cas le terme « saisonnier » est associé à la variable), ou plus généralement, sans aspect temporel.

Tableau 3 : Déclinaison des sept dimensions en caractéristiques fonctionnelles, correspondant à des variables et proxies

Dimension	Caractéristique fonctionnelle	Variables utilisées	Paragraphe associé
1 : Contexte spatial du pixel	Connectivité du milieu / habitat à des milieux / habitats similaires, en prenant en compte la taille des patches	Proportion d'habitats N2000 identiques dans un rayon de 500 m	2.2.6.3
	Diversité locale des milieux / habitats	Diversité d'habitats N2000 dans une zone circulaire d'1 ha autour du pixel	2.2.6. 2.2.6.3
	Qualité scénique du paysage visible depuis le pixel	Diversité de relief et d'habitats OSO visibles dans un rayon de 5 km Note de qualité scénique moyenne associée aux habitats OSO visibles dans un rayon de 5 km Nombre de sommets visibles dans un rayon de 50 km	2.2.8.
	Stabilité du pixel	Nombre d'avalanches Forme de relief	2.2.9. 2.2.2.
2 : Accessibilité du pixel pour l'utilisateur	Epaisseur de neige rendant les déplacements et donc l'accès au pixel et à ses ressources difficiles	Epaisseur de neige moyenne saisonnière dans une zone circulaire d'1 ha autour du pixel Epaisseur de neige moyenne saisonnière sur le pixel	2.2.3.
	Temps d'accès au pixel depuis les points d'entrée de l'unité pastorale	Temps d'accès au pixel saisonnier depuis les points d'entrée de l'unité pastorale	2.2.7.
3 : Conditions abiotiques / géophysiques sur le pixel	Conditions topographiques	Pente Forme de relief Exposition (<i>Easting</i> et <i>Northing</i>) Rayonnement	2.2.2.
	Conditions climatiques	Epaisseur de neige moyenne saisonnière sur le pixel Température moyenne saisonnière sur le pixel Nombre de jours de gel saisonnier du sol Durée d'enneigement continu	2.2.3.
	Conditions associées au substrat	Pourcentage de sol nu Zone d'éboulis ou de roche Nombre d'avalanches (stabilité)	2.2.6. 2.2.9.
4 : Ressources non consommables	Fourniture d'un abri / refuge	Stratification verticale de la végétation Zones d'éboulis ou de roche	2.2.6.

présentes sur le pixel		Luminosité bioindiquée Épaisseur de neige moyenne saisonnière sur le pixel	
	Aspect visuel local	Durée et « intensité » de la floraison	2.2.6.
5 : Qualité des ressources consommables	Qualité nutritive	Appétence Lignosité	2.2.6.
	Diversité alimentaire	Diversité alimentaire	2.2.6.
6 : Quantité des ressources consommables	Quantité de biomasse sur pied disponible	<i>NDVI</i>	
		Pourcentage de sol nu Hauteur de la végétation non arborée	2.2.4. 2.2.6.
	Productivité annuelle potentielle	Nombre de jours de gel sévère sur la période de végétation <i>Growing Degree Days</i> pH bioindiqué Niveau trophique bioindiqué	2.2.3. 2.2.6.
	Quantité d'eau disponible	<i>TWI</i>	2.2.2.
7 : Infrastructures	<i>Hard infrastructures</i> (refuge, cabanes des bergers, chalets et résidences, autres bâtiments)	Distance aux bâtiments	2.2.5.
	<i>Soft infrastructures</i> (protection, règles, évènement, ...)	Statut de protection ¹	

2.2.2. Les caractéristiques fonctionnelles issues d'informations topographiques

Les variables topographiques pente, exposition et forme du relief, sont intégrées à la dimension 3, qui correspond aux caractéristiques géophysiques des pixels. Les informations topographiques permettent également de calculer les zones d'accumulation d'eau, qui impactent la production de biomasse : la variable *TWI* est donc utilisée pour la dimension 6 (quantité de ressources consommables, à savoir les ressources en eau et indirectement les ressources alimentaires liées à la végétation).

Pour le calcul des variables présentées ci-dessus, le modèle numérique de terrain (MNT) est issu de la base de données de l'IGN, le RGE ALTI®, à une résolution de 5 m. En zone de montagne, l'acquisition des données se fait par la technologie Radar (IGN 2013). Les informations d'altitude sont ensuite agrégées pour obtenir la résolution à 25 m.

Le MNT permet de calculer la pente (en degrés) et l'exposition (en degrés) des pixels. Ces calculs sont effectués avec le logiciel R, version 3.6.0². L'exposition varie de 0 à 360°, il y a donc une discontinuité importante entre les points exposés vers le nord-nord-est et vers le nord-nord-ouest, alors que l'exposition est très proche. Pour pallier à ce problème, l'exposition est déclinée en deux variables, *northing* et *easting*, calculées via le cosinus et le sinus de l'exposition respectivement.

¹ Le statut de protection étant le même sur l'ensemble de la zone d'étude, cette variable n'apparaît plus par la suite

² Cette version du logiciel R qui est utilisée pour toutes les analyses présentées par la suite

La forme du relief est également issue du MNT, d'après le calcul de l'index de position topographique (*Topographic Position Index - TPI*) et la déclinaison en dix catégories selon Weiss, 2001. Ces catégories sont présentées dans le tableau en Annexe 2.

Les zones d'accumulation d'eau (*Topographic Wetness Index - TWI*) sont calculées à partir du MNT avec la fonction *upslope.area* de la librairie *dynatopmodel* du logiciel R (Metcalfé, Buytaert 1995).

Le rayonnement solaire incident sur chaque pixel est issu du modèle de rayonnement global HELIOS présenté dans Piedallu, Gégout, 2007, et basé sur le MNT, la latitude et des valeurs de nébulosité. Les données n'étant disponibles qu'à une résolution de 50 m, elles sont ré-échantillonnées en bilinéaire pour obtenir des informations à 25 m.

2.2.3. Le calcul de variables climatiques à partir du modèle SAFRAN-CROCUS

Les variables climatiques affectent la production de biomasse (dimension 6) via la température, mais pas seulement. L'enneigement notamment intervient dans d'autres dimensions : il fait partie des ressources non consommées (dimension 4 : la neige peut servir d'abri ou permettre de skier), il joue sur l'accessibilité du pixel (dimension 2), et est intégré de façon plus générale aux caractéristiques géophysiques du milieu (dimension 3).

Les données issues de la chaîne de simulation SAFRAN - SURFEX/ISBA-Crocus - MEPRA (S2M – Figure 5) ont permis de calculer des variables climatiques pour chacun des pixels. S2M combine des données météorologiques (modèle SAFRAN – Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) à des modèles de surface (plateforme SURFEX – SURFace EXternalisée), pour simuler le risque d'avalanche (MEPRA – Modèle Expert d'Aide à la Prévision du Risque d'Avalanche). La plateforme SURFEX héberge différents modèles de surface, dont ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) pour le sol et Crocus pour le manteau neigeux (Centre National de Recherches Meteorologiques, <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article555> ; Vernay et al., 2019). La chaîne S2M est donc particulièrement adaptée aux zones montagneuses couvertes de neige sur une bonne partie de l'année.

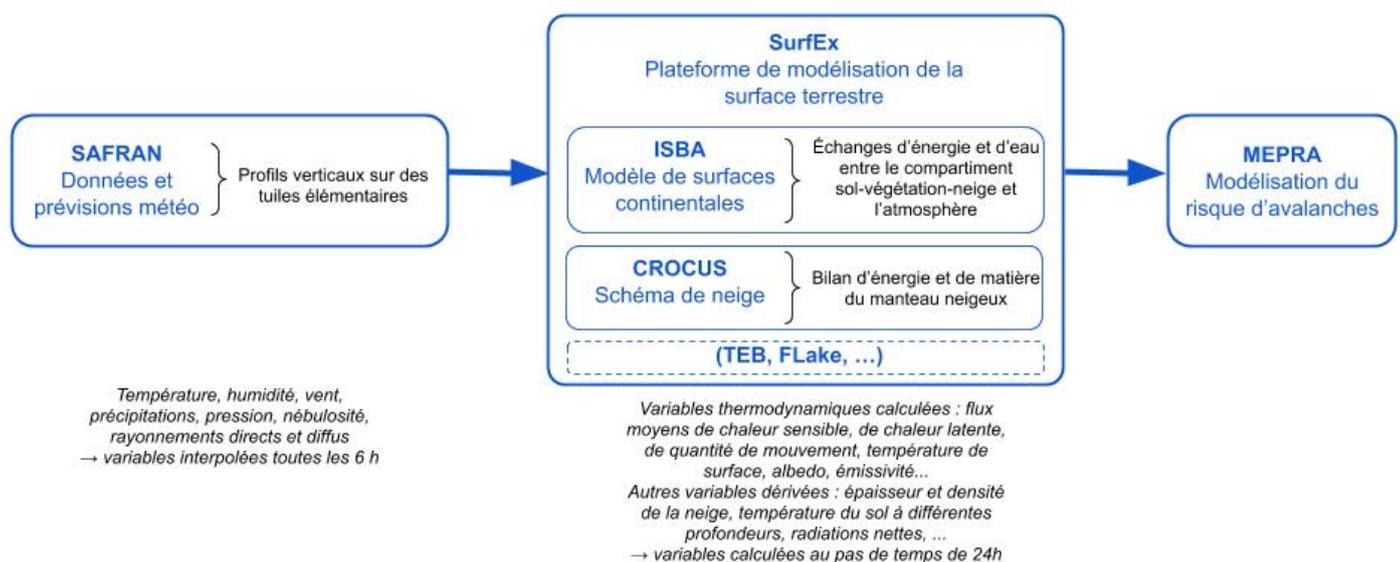


Figure 5 : La chaîne de simulation S2M, utilisée pour la caractérisation des conditions climatiques des pixels

Les simulations S2M ne sont pas directement spatialisées : elles sont effectuées sur des tuiles correspondant à des catégories de massif – classe d’altitude – classe d’exposition – classe de pente (Tableau 4). Chaque pixel de l’unité pastorale du Chardonnet est donc classé dans un des 67 types de tuile présent sur la zone, puis associé aux variables climatiques calculées.

Tableau 4 : Classes des tuiles unitaires utilisées pour les simulations de la chaîne S2M

	Massif	Altitude	Exposition	Pente
Taille des classes		Tous les 300 m	Tous les 45° (et une classe -1 pour les tuiles à plat)	Nulle ; inférieure à 30° ; supérieure à 30°
Nombre total de classes	23 dans les Alpes	17	9	3
Nombre de classes présentes sur l’unité pastorale du Chardonnet	1 (massif du Thabor, n°13)	5	8	2

Les variables climatiques suivantes sont calculées, à partir des valeurs journalières, pour chaque année du 1^{er} août 1997 au 31 juillet 2018 :

- Températures moyennes de l’air sur la période estivale et sur la période hivernale (à partir de la variable TS_ISBA de la chaîne S2M) ;
- Hauteur de neige moyenne sur la période estivale et sur la période hivernale (à partir de la variable DSN_T_ISBA) ;
- Nombre de jours d’enneigement continu (à partir de la variable DSN_T_ISBA) ;
- Nombre de jours de gel du sol (température du sol à 8 cm de profondeur inférieure à 0°C) sur la période estivale et sur la période hivernale (à partir de la variable TG4). Le gel du sol reflète des conditions bio-géophysiques (dimension 3) difficiles : gélifraction du substrat, vie ralentie, etc. En utilisant la température du sol et non pas celle de l’air, les valeurs pour les deux saisons sont comparables : l’effet isolant du manteau neigeux ne biaise pas ce proxy de la difficulté des conditions ;
- Nombre de jours de gel sévère (température de l’air inférieure à -5°C) en dehors de la période d’enneigement continu (à partir de la variable TS_ISBA). Ici le gel n’est pas considéré pour l’hiver ou l’été spécifiquement, mais pour la période de végétation : cette variable concerne la dimension 6, à savoir la productivité potentielle de ressources consommables ;
- Degrés jour de croissance *Growing Degree Days 5.5°C* (GDD5.5) : températures cumulées au-delà de 5,5°C et pour les jours sans neige (à partir de la variable TG4). Cette variable caractérise la productivité végétale potentielle (dimension 6) ;
- Radiations nettes moyennes sur la période estivale et sur la période hivernale (à partir de la variable RN_ISBA).

Les variables utilisées dans l’analyse sont les moyennes interannuelles sur cette fenêtre de 20 ans. Cette fenêtre permet de prendre en compte la gamme de variabilité interannuelle, et n’inclut pas de changements marqués dans les tendances évolutives pour les températures et les cumuls de neige (Chaix et al. 2017).

La hauteur de neige moyenne sur le pixel et ses voisins peut entraver les déplacements : ceci est inclus à la dimension 2 (accessibilité du pixel). Le calcul de cette variable utilise la fonction focale de la

librairie *raster* du logiciel R (Hijmans et al. 2020) et les hauteurs d'enneigement moyennes dans un rayon de 56 m autour du pixel considéré, ce qui correspond à une zone tampon circulaire de 1 ha.

2.2.4. L'apport de l'imagerie satellite

La quantité de biomasse présente et la productivité potentielle (dimension 6) sont affectées par les variables climatiques et topographiques, mais une caractérisation plus directe de cette biomasse est possible, via l'imagerie satellite. En effet, plus la masse de végétation est importante, plus la réflectance dans le proche infrarouge est importante. L'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI *Normalized difference vegetation index*) est fréquemment utilisé, et c'est l'indice choisi ici. Il est calculé à partir des bandes spectrales du rouge (R) et du proche infrarouge (NIR), selon la formule suivante : $NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$.

Les médianes annuelles, hivernales et estivales du NDVI sont calculées sur la plateforme *Google Earth Engine*, à partir des images satellites de Sentinel-2 préalablement corrigées pour l'effet de masque des nuages. A la résolution 10 m, les bandes spectrales NIR et R correspondent aux bandes B8 (longueur d'onde 842 nm) et B4 (longueur d'onde 665 nm) (European Space Agency (ESA) 2015). Les images Sentinel-2 sont disponibles depuis 2016, et la moyenne interannuelle 2016-2019 est utilisée : ceci limite le manque de valeurs et les valeurs instables du fait de la présence de nuages lors des passages du satellite. L'image composite obtenue à la résolution 10 m est agrégée à une résolution de 25 m. Les NDVI saisonniers ont finalement été abandonnés du fait du trop grand nombre de valeurs manquantes (nuages) pour la période hivernale.

2.2.5. Les informations apportées par les bases de données associées aux usages récréatifs

L'accessibilité des pixels (dimension 2) est largement influencée par la présence d'itinéraires tracés. Ces itinéraires sont souvent liés aux infrastructures (dimension 7) et aux usages récréatifs. Les bases de données associées à ces usages sont donc une source d'information importante pour caractériser les dimensions 2 et 7.

De nombreux sites Internet proposent des itinéraires à pied, à ski, en VTT, en raquettes, etc. Via la mise en parallèle des cartes IGN et des itinéraires proposés sur les sites *visuGPX*, *VTTtour*, *skitour*, et *Camptocamp*, sites utilisés dans Byczek et al., 2018, il apparaît que l'été, ces itinéraires correspondent le plus souvent aux sentiers et chemins existants (présents sur les cartes IGN), alors que ce n'est pas le cas l'hiver, où la neige masque ces sentiers. Bien que la neige fraîche et poudreuse attire les skieurs pour la descente, les traces déjà existantes facilitent grandement la montée. De plus, les itinéraires proposés sur les sites Internet sont téléchargeables, et sont associés à des informations de difficulté et de risque potentiel sur certaines portions, ce qui facilite la planification des sorties par les usagers. On considère donc que les skieurs sont canalisés au niveau des parcours référencés.

Ainsi la BD TOPO® de l'IGN (IGN 2019) est utilisée pour les chemins estivaux, et le site *Camptocamp* pour les itinéraires hivernaux. Un seul site (parmi ceux cités dans le paragraphe précédent et les autres sites existants) est retenu du fait de la redondance des parcours référencés. et *Camptocamp* a l'avantage de regrouper des informations sur :

- les itinéraires : parcours reconnus reliant des points d'intérêt ;
- les sorties : parcours effectués suivant un itinéraire existant, à une date donnée avec des personnes identifiées, avec des détails sur les ressentis, les difficultés rencontrées, ... La présence de nombreuses sorties pour un itinéraire donné est donc un signe de forte fréquentation du parcours, même si un biais existe du fait que tous les skieurs ne référencent pas leurs sorties ;

- les points d'intérêt, ou points de passage : pics, sommets, lacs, cols, crêtes, refuges, sources, canaux, points d'accès et parkings, ... Parmi ces points, les pics et sommets, les refuges et les parkings sont utilisés par la suite (voir les paragraphes 2.2.7. et 2.2.8.).

Les traces .gpx sont téléchargées sur le site collaboratif de camptocamp association, <https://www.camptocamp.org> , puis rastérisées sur la grille à 25 m correspondant à l'unité pastorale. Les sentiers de la BD TOPO® sont également transformés en raster.

2.2.6. Des caractéristiques fonctionnelles réinterprétées à partir de la cartographie d'habitats et d'informations complémentaires non spatialisées

Les dimensions 5, 6, et 4 dans une moindre mesure (respectivement la qualité des ressources consommables, leur quantité, et les ressources non consommables) sont largement liées à la végétation, qui est une ressource alimentaire mais aussi structurelle. Les classifications phytosociologiques et les habitats se rattachent en grande partie à la végétation en place : ce sont donc des informations pertinentes pour remonter aux caractéristiques de la végétation.

L'unité pastorale du Chardonnet fait partie du site Natura 2000 Clarée, les habitats présents ont donc été cartographiés à fine échelle, au 1/50 000. Cette échelle est cohérente avec la résolution de 25 m choisie pour l'étude. La cartographie des habitats est donc une source d'information intéressante mais peu fonctionnelle : les caractéristiques fonctionnelles sont masquées par la classification experte en habitats. Nous avons donc fait la démarche inverse, en réinterprétant fonctionnellement les habitats, à partir des espèces qui y sont associées et de leur descriptif dans le DOCOB et les cahiers d'habitats (Vivat et al. 2014b ; Bensettiti et al. 2002 ; 2005 ; 2001).

2.2.6.1. Caractérisation de chaque type d'habitat Natura 2000 présent sur le site

Caractéristiques fonctionnelles calculées à partir du caractère indicateur des espèces présentes dans l'habitat

Les moyennes pondérées par communauté (*Community-Weighted Means*) de traits végétaux sont souvent utilisées lorsqu'on cherche à agréger des traits de l'échelle individuelle à l'échelle de la communauté (Garnier et al. 2007 ; Grigulis et al. 2013 ; Lavorel, Grigulis, et al. 2007). Nous reprenons ici cette méthode pour passer des caractéristiques fonctionnelles des espèces aux caractéristiques fonctionnelles des habitats. Pour cela, nous considérons les caractères indicateurs des plantes correspondant aux préférences trophiques, de pH (ou réaction), et de lumière (Tableau 5). Ces informations sont issues de la base de données FLORAINdicativa (Landolt et al. 2010).

Tableau 5 : Caractères indicateurs retenus et valeurs possibles

Caractère indicateur	Gradient de variation				
	1	2	3	4	5
Trophie / Nutriments	← 1 Très peu fertile				5 → Très fertile
pH / Réaction	← 1 Très acide				5 → Alcalin, pH élevé
Lumière	← 1 Ombrage fort				5 → Pleine lumière

Pour chaque habitat, les espèces caractéristiques et différentielles du groupement sont sélectionnées sur les fiches habitat du DOCOB (Vivat et al. 2014a). Comme leur dénomination l'indique, ces espèces sont supposées être bien représentatives de la communauté de l'habitat.

Parmi ces espèces, seules celles qui sont potentiellement dominantes sont retenues, en considérant que d'après l'hypothèse du ratio de biomasse de Grime (Grime 1998), les caractéristiques fonctionnelles de la communauté sont déterminées en grande partie par les espèces végétales dominantes, qui contribuent le plus à la production de biomasse. Pour sélectionner les espèces dominantes, des relevés du Conservatoire Botanique National Alpin (CBNA) réalisés dans la région d'étude sont utilisés : pour chaque espèce, la valeur maximale d'abondance (coefficients de Braun-Blanquet) rencontrée est calculée, et les espèces dont la classe d'abondance maximale est inférieure ou égale à 2 sont éliminées.

Il est ainsi possible de calculer le caractère indicateur moyen associé à l'habitat, à partir de ces listes d'espèces caractéristiques, différentielles et dominantes : les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau en Annexe 3.

Réinterprétation directe des cahiers d'habitat et du DOCOB

A partir des descriptions d'habitats présentes dans le DOCOB et d'autres sources d'information (Vivat et al. 2014a ; Villaret et al. 2019 ; Bornard et al. 2007), des notes fonctionnelles ont été attribuées à chaque habitat. Ces notes sont utiles pour caractériser trois des sept dimensions définies au paragraphe 1.2.4. :

- Les ressources non consommables (dimension 4), peuvent concerner l'aspect visuel du pixel ou la fourniture d'un abri. Les habitats sont donc notés pour la présence d'une végétation fleurie et colorée qui persiste dans le temps, pour leur caractère caillouteux ou rocheux, et pour la densité verticale de la végétation (nombre de strates de végétation).
- Concernant la qualité alimentaire (dimension 5), l'appétence, la lignosité et la diversité alimentaire potentielle sont notées. Ces caractéristiques ont été considérées par rapport à l'attrait de la végétation pour les animaux, sa digestibilité, et la potentielle richesse nutritive d'une alimentation diversifiée respectivement.
- Pour la quantité de ressources consommables, principalement alimentaires (dimension 6), le pourcentage de sol nu et la hauteur de la végétation permettent d'évaluer la quantité de biomasse présente.

A chaque habitat est également attribuée une valeur de vitesse à plat, dont le principe et l'utilisation sont détaillés dans le paragraphe 2.2.7.

Les valeurs possibles pour les dix variables correspondantes sont présentées dans le tableau en Annexe 3.

2.2.6.2. Transposition de l'information par habitat à des caractéristiques par pixel

Certains polygones comportent une mosaïque d'habitats, mais à une échelle trop fine pour qu'ils soient divisés en différents polygones. Nous considérons donc que le calcul d'une caractéristique fonctionnelle moyenne, prenant en compte cette mosaïque, est plus juste que la caractéristique fonctionnelle de l'habitat dominant.

La donnée issue du DOCOB est riche du fait que chaque polygone homogène est caractérisé par son habitat principal et des habitats secondaires, tertiaires, ... présents en mosaïque. La proportion de chacun de ces habitats est également indiquée. Pour chaque caractéristique fonctionnelle et pour chaque polygone homogène, une valeur moyenne pondérée est ainsi calculée, selon l'équation (1).

$$\varphi = \sum_{i=1}^3 \varphi_i * \omega_i \quad (1)$$

avec : φ la caractéristique fonctionnelle moyenne pondérée pour le polygone considéré

i le niveau de l'habitat dans le polygone considéré : principal, secondaire ou tertiaire

φ_i la caractéristique fonctionnelle de l'habitat i

ω_i la proportion de l'habitat i dans le polygone considéré

Les informations associées à chaque polygone sont ensuite extraites pour tous les pixels correspondants dans l'unité pastorale.

2.2.6.3. *Autres calculs basés sur la cartographie des habitats : la connectivité et la diversité locale en habitats*

Pour la dimension 1, à savoir le contexte spatial des pixels, la connectivité de chaque pixel aux autres pixels par rapport à leurs habitats est caractérisée. Elle correspond à la proportion d'habitat identique à celui du pixel considéré dans un rayon de 500 m. Le rayon de 500 m a été choisi par rapport au potentiel de dissémination longue distance des espèces végétales (Vittoz, Engler 2007). Par ailleurs, la diversité locale en habitats permet de décrire leur hétérogénéité spatiale. Cette diversité peut affecter l'aspect esthétique du lieu ou la disponibilité de ressources diverses autour du pixel. Dans ce cas, un rayon plus faible a été choisi, de façon à avoir une zone d'un hectare (56 m de rayon environ). L'indice de diversité de Shannon est utilisé, pour prendre en compte à la fois le nombre d'habitats différents et leur proportion relative.

Pour ces calculs, les fonctions focales de la librairie *raster* du logiciel R sont utilisées (Hijmans et al. 2020). Seul l'habitat dominant de chaque pixel est considéré, dans un souci de simplification.

2.2.7. **Le calcul des chemins de moindre coût**

La végétation en place affecte les déplacements en rendant la surface rugueuse. Cette rugosité est donc liée à l'accessibilité du pixel (dimension 2). L'augmentation d'altitude et de pente rend aussi les déplacements plus difficiles. La présence de sentiers au contraire est supposée faciliter les mouvements des usagers, qu'ils soient animaux ou humains. Ces différents éléments sont intégrés au calcul des chemins de moindre coût, suivant la méthode proposée par Weiss et al., 2018.

Le calcul est effectué en trois grandes étapes :

- Calcul d'une surface de friction pour l'ensemble de l'unité pastorale, correspondant à la difficulté de déplacement au sein de chaque pixel.
 - Une vitesse potentielle de déplacement sans relief est attribuée à chaque pixel. En absence de reliefs, la vitesse de déplacement est principalement liée à la végétation qui entrave les déplacements : nous utilisons donc la cartographie d'habitats Natura 2000. Les valeurs de vitesse attribuées à chaque habitat sont présentées dans le tableau en Annexe 3. Elles sont inspirées des vitesses associées aux types *MODIS Land Cover* utilisées dans Weiss et al., 2018. Une moyenne pondérée de la vitesse est attribuée à chacun des pixels selon les habitats principaux, secondaires et tertiaires présents, suivant la méthode présentée dans le paragraphe 2.2.6.2. Lorsque le pixel est traversé par un chemin, la vitesse sans relief affectée au pixel est directement de 5 km/h, vitesse fréquemment utilisée pour les déplacements à pied, et correspondant à la règle de Naismith (Naismith 1892). En hiver nous considérons également que la

végétation n'affecte plus les déplacements, car elle est couverte de neige : la valeur de 5 km/h est affectée à tous les pixels.

- La vitesse potentielle de déplacement est ajustée en prenant en compte la pente (fonction de Tobler, équation (2)) et l'altitude (diminution de la VO2 max avec la raréfaction de l'oxygène en altitude, équation (3)). Les fonctions utilisées sont les suivantes :

$$v_{ajustée\ pente} = \frac{v_{non\ ajustée}}{5} * 6 * e^{-3.5 * |\tan(\frac{\pi}{180} * \alpha) + 0.05|} \quad (2)$$

$$v_{ajustée\ altitude} = v_{non\ ajustée} * 1.016 * e^{-0.0001072 * z} \quad (3)$$

avec : v les vitesses (avant ou après ajustement pour la pente puis l'altitude)

α l'angle de pente en degrés (de sorte que $\tan(\frac{\pi}{180} * \alpha)$ est le gradient de pente)

z l'altitude en mètres

- Calcul d'une matrice de transition entre chaque pixel et ses huit voisins (fonction *transition* de la librairie *gdistance* sous R), avec géo-corrrection pour prendre en compte le fait que le pixel est voisin direct ou voisin en diagonale (fonction *geoCorrection* de la même librairie) (Etten, Sousa 2020).
- Accumulation des coûts de transition entre pixels afin d'obtenir un temps de trajet minimal entre le pixel et l'un des deux parkings situés à proximité de l'unité pastorale (parking de Fontcouverte et parking du Pont de la Souchère, tous deux en fond de vallée). C'est l'algorithme de Dijkstra qui est utilisé pour trouver le parcours le moins coûteux en temps.

Ainsi les barrières physiques nécessitant un contournement sont prises en compte, avec une vitesse très faible sur le pixel où se trouve l'obstacle (ex. vitesse faible pour les milieux humides, ou vitesse ajustée par rapport à la pente faible, du fait de la présence d'une falaise verticale).

La méthode de calcul des temps d'accès est appropriée pour les déplacements humains à pied ou à ski. Les déplacements par véhicules motorisés (motoneige, quad) sont considérés comme anecdotiques et limités à la partie basse de la zone. Par ailleurs, nous cherchons à caractériser l'accessibilité des pixels, et nous considérons donc qu'un pixel relativement plus accessible à pied (temps de trajet plus faible) sera aussi relativement plus accessible à vélo ou avec un autre véhicule, qui emprunterait plutôt les pistes et chemins. Les déplacements animaux sont moins concernés par ces temps de parcours, étant donné qu'il n'y a pas de point de départ (équivalent à un parking) bien identifié pour le calcul.

Il apparaît que certains pixels sont quasiment inaccessibles avec la méthode de calcul utilisée. Il s'agit de pixels situés au niveau des crêtes rocheuses du Queyrellin et du Raisin, où le temps d'accès est supérieur à une semaine voire infini : ces valeurs extrêmes peuvent biaiser l'analyse. Nous considérons que ces pixels sont en fait accessibles pour les animaux (chamois, bouquetins...) et pour les humains moyennant un équipement adéquat (matériel d'escalade). Sur des sites référençant les voies d'escalade (camptocamp association, <https://www.camptocamp.org>), il apparaît que les courses menant aux Tours du Queyrellin et aux crêtes du Raisin prennent un à deux jours. Ainsi un temps d'accès de trois jours (4320 min) est affecté à tous les pixels dont les temps d'accès sont supérieurs à trois jours. Ceci limite les valeurs extrêmes sources de biais tout en conservant une valeur bien supérieure à celle des pixels relativement accessibles.

2.2.8. Le calcul des cônes de visibilité et des variables associées

La qualité esthétique des paysages est reconnue dans la vallée de la Clarée (source : *entretien auprès de l'office de tourisme de Névache, réalisé par Isabelle Boulangeat – 2018*). La beauté scénique prend

en compte l'entourage plus ou moins proche du pixel et est donc ajoutée à la dimension 1 (contexte spatial du pixel).

La visibilité décroît avec la distance, et est limitée par les reliefs. En s'inspirant des méthodes présentées dans différents articles (Vigl et al. 2017 ; Byczek et al. 2018 ; Schirpke et al. 2013 ; 2016), nous avons donc distingué d'une part la visibilité proche, jusqu'à 5 km (distance cohérente avec la taille de l'unité pastorale étudiée), où l'œil est capable de distinguer différents types de milieux (milieu minéral, forêt, pelouse, lande, eau libre, zone artificialisée), et d'autre part la visibilité à longue distance, jusqu'à 50 km. A cette distance, la résolution visuelle et la capacité à voir les détails sont limitées, et les reliefs marqués sont les éléments les plus importants, qui attirent le regard et participent à la beauté scénique du paysage.

Ainsi, la zone visible depuis chaque pixel a été calculée à partir du MNT à 25 m et dans un rayon de 5 km autour de chaque pixel. Les pixels dominés par la forêt sont considérés comme aveugles, et la valeur 0 est attribuée à leurs caractéristiques de visibilité. La fonction *r.viewshed* de la librairie *rgrass7* sous R est utilisée (Bivand et al. 2019). Dans la zone obtenue, la diversité de milieux visibles est calculée, en considérant qu'un paysage hétérogène et diversifié est d'autant plus agréable à regarder. Les données d'habitat Natura 2000 n'étant pas disponibles pour l'ensemble des zones de visibilité, c'est la cartographie d'occupation des sols OSO qui a été utilisée (OSO 2018, <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/~oso/>). Les cartes OSO sont obtenues par photo-interprétation automatisée d'images satellites, et disponibles à une résolution de 20 m. Seule la classe dominante de chaque unité spatiale est retenue, sachant que ces classes correspondent bien à ce qui peut être visible à une distance de 5 km, à savoir les forêts, les surfaces minérales, les landes, les pelouses, les prairies, les zones urbanisées, l'eau libre, et les zones de neige ou de glace permanente. La diversité de forme de relief est également utilisée comme indicateur de la qualité scénique du paysage (les formes de relief sont calculées à partir du MNT suivant la méthode présentée dans le paragraphe 2.2.2.). L'indice de diversité de Shannon est utilisé dans les deux cas.

Un troisième indicateur est calculé pour caractériser la beauté scénique du paysage proche, en se basant sur une notation de la qualité visuelle perçue. Une note inspirée de Vigl et al., 2017 et Burkhard et al., 2009 (Tableau 6) est attribuée à chaque type de milieu, et la moyenne des notes des milieux visibles depuis le pixel est calculée (la notation proposée par les auteurs est « à dire d'expert », pour un milieu montagnard des Alpes italiennes).

Tableau 6 : Notes de qualité esthétique de différents types de milieux, utilisées pour évaluer la qualité scénique du paysage visible depuis chaque pixel. Inspiré de Vigl et al., 2017 et Burkhard et al., 2009

Classe de milieu OSO	Code	Note de qualité esthétique
Forêts	31 - 32	4.3
Pelouses	34	4
Landes	36	3
Milieu urbain diffus	42	2.3
Zones commerciales	43	0.3
Surfaces minérales – roche	45	5
Eau libre	51	4.7
Glacier – neige permanente	53	4.7
Prairie	211	4
Cultures	11 - 12	1.7

Dans le rayon de 50 km, un MNT à résolution moins fine a été utilisé, pour limiter le temps de calcul. De plus, la capacité de l'œil à distinguer les détails diminue avec la distance : un MNT à très fine résolution n'est donc pas nécessaire. Les zones de visibilité sont à la fois en France et en Italie. Pour

les premières, le MNT à 25 m a été agrégé à 250 m, et pour les secondes, le MNT produit par la NASA avec la mission *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, <https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>) est utilisé, agrégé de 90 m à 250 m. A cette distance, le nombre de sommets visibles est l'indicateur retenu, en se basant sur la carte des pics et sommets reconnus comme points d'intérêts dans la base de données *Camptocamp*.

2.2.9. D'autres sources de données spatiales permettant de compléter la base de caractéristiques fonctionnelles

La base de données de la CLPA

La stabilité géomorphologique du pixel est une caractéristique géophysique supplémentaire (dimension 3). Cette caractéristique est également ajoutée à la dimension 1 car elle est liée au contexte local du pixel. L'instabilité peut être révélée par la fréquence des éboulements ou des avalanches. Des informations cartographiées sont disponibles pour les secondes, via la Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche (CLPA - INRAE, <http://www.avalanches.fr/clpa-presentation/>). Cette base de données regroupe l'emprise des phénomènes d'avalanche avérés et les zones avalanches, repérés sur des photographies aériennes, par des analyses de terrain et issus de témoignages. Cette cartographie informative est réalisée au 1/25 000, et référence aussi des événements historiques (jusqu'en 1937 dans la zone étudiée). Ainsi le nombre d'avalanches ayant traversé chaque pixel par le passé est calculé et caractérise son instabilité.

Les informations supplémentaires fournies par le berger

Les infrastructures associées aux usages récréatifs sont cartographiées dans des bases de données spécifiques, mais sur l'unité pastorale il n'existe pas de données concernant les infrastructures pastorales : abreuvoirs, parcs permanents. Le berger présent sur l'alpage permet de compléter ces lacunes et donc potentiellement la caractérisation du milieu selon la dimension 7.

Il s'avère qu'avant l'été 2020, aucun abreuvoir n'était installé sur l'alpage³, le troupeau s'abreuvant dans les torrents et ruisseaux. Par ailleurs il n'existe pas de parcs à ovins en dur sur l'unité pastorale du Chardonnet, mais seulement des parcs mobiles délimités par des filets. Ce caractère non-permanent nous a amené à considérer les parcs à filets (parcs de nuit, couchades tournantes) comme des usages plutôt que des infrastructures effectives (voir paragraphe 4.1.1.2).

2.3. Discussion concernant la construction de la base de données : une dépendance forte à la disponibilité des informations

Pour la construction de la base de données, il faut composer avec la disponibilité des informations. Cela aboutit à l'utilisation de proxies ou de résultats de modèles, qui peuvent être source de biais. Nous nous focalisons ici sur deux groupes de données, rattachés aux paragraphes 2.2.3. et 2.2.6.

Les informations météo ne peuvent pas être mesurées en tout point de l'unité d'étude, et sont issues du modèle SAFRAN-CROCUS. Les tuiles en entrée de la chaîne de modélisation correspondent à des catégories topographiques sur lesquelles se basent les calculs thermodynamiques, mais certains paramètres ne sont pas pris en compte, comme la végétation sur la tuile : le modèle suppose qu'une végétation rase est présente au sol. Or la dynamique du manteau neigeux est différente avec un couvert

³ Un abreuvoir a finalement été installé au début de la saison pastorale 2020, mais cette information n'était pas disponible au moment de la construction de la base de données (communication du berger, juillet 2020). Il est situé au niveau des Faurets (à proximité de la plus grande couchade).

rocheux, de pelouse ou forestier, par exemple les arbres interceptent la neige qui ne s'accumule pas de la même façon au sol. Les biais du modèle se répercutent donc dans la base de données construite.

Par ailleurs, la plupart des caractéristiques associées à la végétation ont été dérivées de la cartographie d'habitats Natura 2000, puisque c'est la donnée disponible à la plus fine résolution spatiale. Cela suppose qu'un même habitat possède les mêmes caractéristiques fonctionnelles, alors que différents faciès peuvent exister : la typologie Natura 2000 est développée à l'échelle européenne et prend donc difficilement en compte ces variantes. Les informations sur les habitats secondaires et tertiaires de chaque polygone permettent de raffiner la caractérisation fonctionnelle moyenne du polygone, mais ces habitats d'arrière-plan en mosaïque ne sont pas localisés. Il est ainsi difficile de passer outre le caractère discontinu de la cartographie vectorielle.

3. Description fonctionnelle des milieux par analyses multivariées

La première question posée dans cette étude est : (1) qu'est-ce qui distingue les différents milieux de l'unité pastorale étudiée, d'un point de vue fonctionnel, en été et en hiver ? Pour y répondre, nous reprenons le principe du « tableau périodique de niches » (Winemiller et al. 2015) en l'appliquant aux pixels de l'unité pastorale.

3.1. Méthode mise en place

3.1.1. Réduction de la base de données selon les sept dimensions retenues

Nous cherchons à avoir une information spatio-temporelle sur l'unité pastorale, en se focalisant sur deux saisons spécifiques, l'hiver et l'été. Chaque « individu » étudié correspond donc à un couple pixel-saison. Les sept dimensions retenues regroupent de 3 à 13 variables, potentiellement redondantes, que nous résumons donc en 1 à 3 axes informatifs, via des analyses multivariées. La démarche est explicitée ci-après et sur le schéma de la Figure 6.

Chaque « individu » est caractérisé par des variables quantitatives et qualitatives, ce sont donc des analyses de données mixtes qui sont menées. Pour cela, le tableau 'pixel-saison x variables' ('caractéristiques fonctionnelles de chaque couple pixel-saison' sur la Figure 6) est transformé avec la fonction *dudi.mix* de la librairie *ade4* sous R (Dray et al., 2018) : les variables quantitatives sont centrées et réduites, les variables factorielles ou qualitatives sont décomposées en indicatrices de classes (codage disjonctif) puis centrées. Des pondérations font en sorte que chaque variable ait le même poids que les autres, afin d'éviter qu'une variable factorielle à x niveaux, décomposée en x indicatrices, ait x fois plus de poids qu'une variable quantitative. Les pondérations valent donc 1 si la variable est quantitative, et valent 'la fréquence de la modalité' pour l'indicatrice correspondant à la modalité de la variable qualitative (ainsi le poids total de la variable qualitative vaut 1 : c'est la somme des poids des indicatrices correspondantes).

Pour chaque dimension i (i allant de 1 à 7), une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée sur le tableau 'pixel-saison x variables transformées de la dimension i ', avec la fonction *PCA* de la librairie *FactoMineR* sous R (Husson et al. 2019). L'observation des valeurs propres, du pourcentage de variance expliquée, et du cercle des variables permet de choisir le nombre d'axes à retenir. Les coordonnées des couples pixel-saison sur les axes retenus sont enregistrées. On obtient ainsi un tableau réduit par rapport au tableau initial : ce tableau 'pixel-saison x coordonnées selon les 7 ACP' ('tableau des caractéristiques fonctionnelles des pixels réduit' sur la Figure 6) est utilisé dans la suite de l'étude.

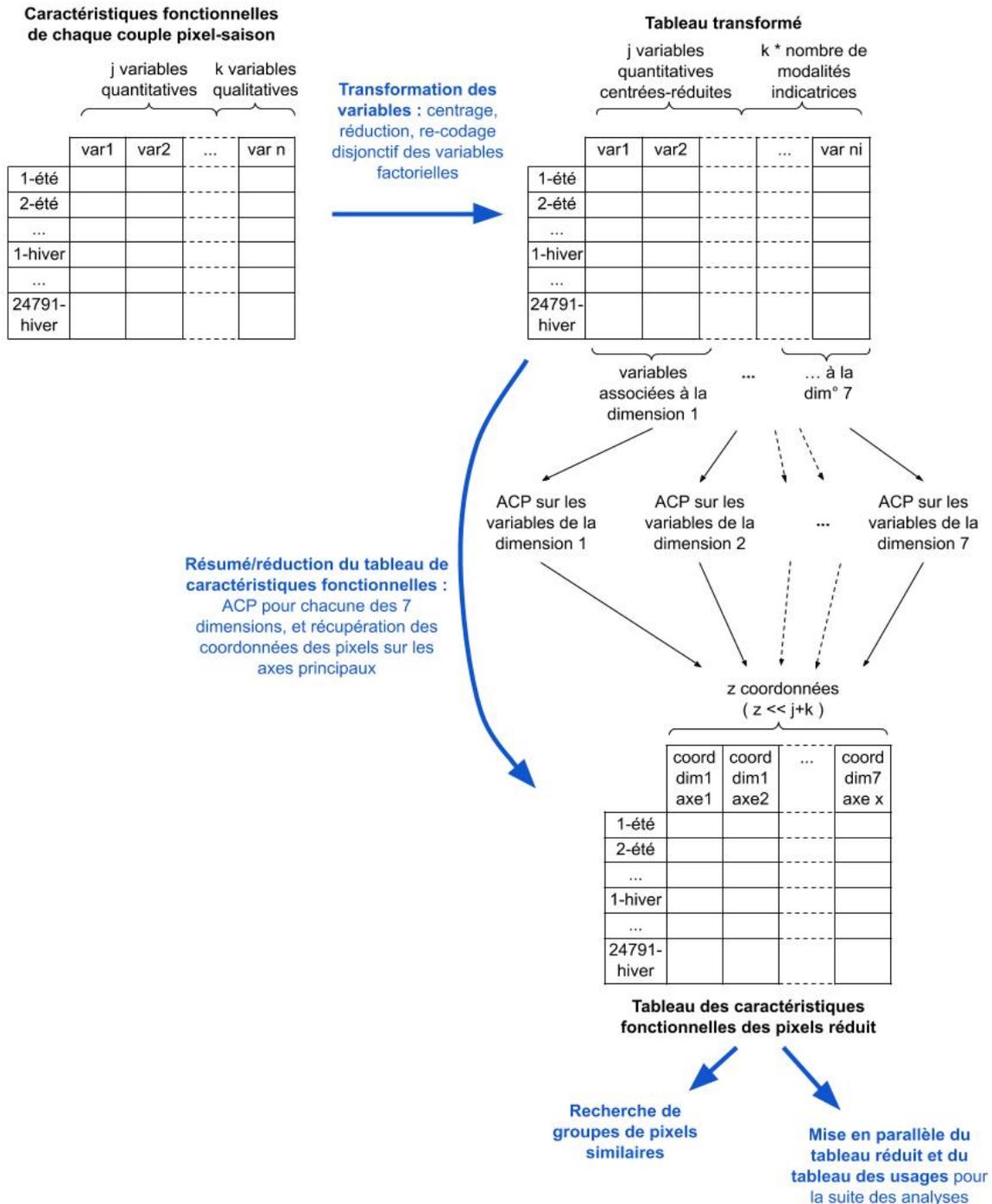


Figure 6 : Procédure mise en place pour réduire le tableau des caractéristiques fonctionnelles des pixels

3.1.2. Recherche de groupes de pixels fonctionnellement similaires

Pour rechercher les groupes de pixels fonctionnellement similaires, il est possible de réaliser une classification à partir d'une matrice de distance inter-pixels. Cependant le nombre de pixels dans l'étude est trop important par rapport à la puissance de calcul de l'ordinateur utilisé. Une méthode de groupement plutôt visuelle est donc utilisée ici.

Deux nouvelles ACP (une pour l'été et une pour l'hiver) sont donc appliquées aux deux sous-tableaux 'pixel-saison estivale x coordonnées selon les 7 ACP' et 'pixel-saison hivernale x coordonnées selon

les 7 ACP'. Les coordonnées des pixels sur les trois premiers axes de ces ACP sont alors transformées en un code de 0 à 255, et utilisées pour colorer chaque pixel en suivant le codage RVB. Les pixels les plus fonctionnellement similaires sont plus proches dans l'espace 3D des ACP, et sont donc représentés par des couleurs plus proches.

3.2. Résultats

3.2.1. Analyses en Composantes Principales sur chacune des dimensions, et dégagement de sous-dimensions

Les cercles de corrélation des variables résultant des ACP ainsi que les diagrammes en barre des valeurs propres sont disponibles en Annexe 4.

Dimension 1 : Contexte spatial des pixels

Les trois premiers axes permettent d'expliquer plus de 60 % de la variance (68 %) associée à cette dimension. La sélection de trois axes repose sur la décroissance des valeurs propres et l'interprétabilité des axes. Les caractéristiques principales qui les décrivent sont présentées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées au contexte spatial des pixels (dimension 1)

Axe	Caractéristiques fonctionnelles les plus corrélées à l'axe (corrélation > 0.6) et coefficient de corrélation		Signification/interprétation d'une coordonnée plus grande selon l'axe
1	Note moyenne de qualité scénique dans le cône de visibilité	0.95	Cône de visibilité considéré comme plus diversifié et plus esthétique
	Diversité de forme de relief dans le cône de visibilité	0.90	
	Diversité de milieux dans le cône de visibilité	0.84	
2	Diversité locale en habitats dans une zone tampon d'1 ha	-0.86	Milieu moins diversifié localement mais connectivité à 500 m plus importante
	Proportion d'habitats similaires dans un rayon de 500 m	0.63	
3	Nombre d'avalanches	0.90	Pixel moins stable géo-morphologiquement

Dimension 2 : Accessibilité des pixels pour les usagers

Les deux premiers axes permettent d'expliquer plus de 99 % de la variance associée à cette dimension. La sélection de deux axes s'est faite sur leur distinction bien marquée. Les caractéristiques qui les décrivent sont présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à l'accessibilité des pixels (dimension 2)

Axe	Caractéristiques fonctionnelles les plus corrélées à l'axe (corrélation > 0.6) et coefficient de corrélation		Signification/interprétation d'une coordonnée plus grande selon l'axe
1	Enneigement moyen sur le pixel	0.99	Difficulté d'accès plus importante du fait de l'enneigement
	Enneigement moyen dans une zone tampon d'1 ha	0.99	
2	Temps d'accès	0.98	Pixel moins accessible depuis les points d'entrée de l'unité pastorale

Dimension 3 : Caractéristiques géophysiques des pixels

Les deux premiers axes permettent d'expliquer 49.0 % de la variance associée à cette dimension. Le choix du nombre d'axe s'est fait au vu de la cassure dans la décroissance des valeurs propres de l'ACP. Les caractéristiques qui les décrivent sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques géophysiques des pixels (dimension 3)

Axe	Caractéristiques fonctionnelles les plus corrélées à l'axe (corrélation > 0.6) et coefficient de corrélation		Signification/interprétation d'une coordonnée plus grande selon l'axe
1	Enneigement moyen sur le pixel	0.98	Energie thermique disponible plus faible
	Température moyenne	-0.97	
	Rayonnement net moyen	-0.96	
	Nombre de jours de gel du sol	0.95	
2	Pourcentage de sol nu	0.90	Moins de sol disponible, pixel en zone plus caillouteuse
	Caractère ni caillouteux ni rocheux du substrat	-0.89	
	Durée d'enneigement continu	0.63	
	Caractère caillouteux du substrat	0.63	

Dimension 4 : Ressources non consommables présentes sur les pixels

Les trois premiers axes permettent d'expliquer 88.3 % de la variance associée à cette dimension. Le choix du nombre d'axe s'est fait au vu de la cassure dans la décroissance des valeurs propres de l'ACP. Les caractéristiques principales qui les décrivent sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées aux ressources non consommables présentes sur les pixels (dimension 4)

Axe	Caractéristiques fonctionnelles les plus corrélées à l'axe (corrélation > 0.6) et coefficient de corrélation		Signification/interprétation d'une coordonnée plus grande selon l'axe
1	Caractère coloré de la végétation, qui persiste dans le temps	0.94	Aspect visuel local plus coloré
	Enneigement moyen	-0.90	
2	Nombre de strates de végétation	0.81	Densité verticale de la végétation plus importante
3	Niveau de lumière bioindiqué	0.80	Fourniture d'abris ou caches topographiques et minérales (ombre, zones rocheuses) moins importante
	Caractère ni caillouteux ni rocheux du substrat	0.68	
	Caractère caillouteux du substrat	-0.65	

Dimension 5 : Qualité des ressources consommables présentes sur les pixels

Les deux premiers axes permettent d'expliquer 97.1 % de la variance associée à cette dimension. La sélection de deux axes s'est faite sur leur distinction bien marquée. Les caractéristiques qui les décrivent sont présentées dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à la qualité des ressources consommables présentes sur les pixels (dimension 5)

Axe	Caractéristiques fonctionnelles les plus corrélées à l'axe (corrélation > 0.6) et coefficient de corrélation		Signification/interprétation d'une coordonnée plus grande selon l'axe
1	Diversité alimentaire disponible sur le pixel	0.98	Diversité alimentaire plus importante
	Lignosité de la végétation (hors strate arborée)	0.92	

2	Appétence de la végétation (hors strate arborée)	0.92	Attrait de la végétation pour les herbivores plus importante
---	--	------	--

Dimension 6 : Quantité de ressources consommables présente sur les pixels

Le premier axe permet d'expliquer 45.5 % de la variance associée à cette dimension. Le choix du nombre d'axe s'est fait au vu de la cassure dans la décroissance des valeurs propres de l'ACP. Les caractéristiques qui les décrivent sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à la quantité de ressources consommables présente sur les pixels (dimension 6)

Axe	Caractéristiques fonctionnelles les plus corrélées à l'axe (corrélation > 0.6) et coefficient de corrélation		Signification/interprétation d'une coordonnée plus grande selon l'axe
1	NDVI moyen annuel	0.93	Quantité de biomasse (densité horizontale et verticale) et productivité potentielle plus importante
	Pourcentage de sol nu	-0.90	
	GDD sur la période non enneigée	0.85	
	Hauteur de la végétation (hors strate arborée)	0.76	

Dimension 7 : Infrastructures présentes sur les pixels

Le premier axe permet d'expliquer 100 % de la variance associée à cette dimension. Les caractéristiques qui les décrivent sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Résultats de l'ACP sur les caractéristiques associées à la présence d'infrastructures sur les pixels (dimension 7)

Axe	Caractéristiques fonctionnelles les plus corrélées à l'axe (corrélation > 0.6) et coefficient de corrélation		Signification/interprétation d'une coordonnée plus grande selon l'axe
1	Distance aux infrastructures dures	1	« Naturalité » plus importante

Récapitulatif des sous-dimensions obtenues

Le tableau de caractéristiques fonctionnelles est ainsi résumé en quatorze axes, répartis selon les sept dimensions définies au préalable. Ces quatorze axes correspondent à des sous-dimensions nommées dans le Tableau 14. Sur le schéma de la Figure 6, les quatorze sous-dimensions sont les colonnes du tableau nommé 'tableau des caractéristiques fonctionnelles des pixels réduit'.

Tableau 14 : Sous-dimensions résumant les caractéristiques fonctionnelles des pixels de l'unité pastorale. Le sens de variation de la sous-dimension le long de l'axe de l'ACP est précisé en italique, avec le symbole + si la coordonnée du pixel selon l'axe et l'attribut de la sous-dimension varient dans le même sens, et le symbole - s'ils varient en sens opposé.

Code de l'axe, ou sous-dimension	Nom de la sous-dimension	Nom court
Dim1 – axe 1	Qualité scénique <i>(esthétisme +)</i>	Ctxt_Vue
Dim1 – axe 2	Situation écologique fonctionnelle <i>(diversité locale -, connectivité à 500 m +)</i>	Ctxt_Fonctio
Dim1 – axe 3	Instabilité géomorphologique <i>(instabilité +)</i>	Ctxt_Instab
Dim2 – axe 1	Difficulté d'accès liée à l'enneigement <i>(difficulté +)</i>	Acces_Neige
Dim2 – axe 2	Temps d'accès depuis les points d'entrée <i>(temps +)</i>	Acces_Temps
Dim3 – axe 1	Energie thermique disponible <i>(énergie -)</i>	Abio_Therm

Dim3 – axe 2	Sol disponible (sol -)	Abio_Sol
Dim4 – axe 1	Aspect visuel local (floraison et neige) (coloration +, neige -)	Immat_Visuel ⁴
Dim4 – axe 2	Densité verticale de la végétation (densité +)	Immat_StrVeg
Dim4 – axe 3	Abris et caches (abris -)	Immat_Abri
Dim5 – axe 1	Diversité alimentaire (diversité +)	Mat_DivAlim
Dim5 – axe 2	Attractivité alimentaire (attractivité +)	Mat_Appetence
Dim6 – axe 1	Quantité de biomasse (biomasse +)	Mat_Biomasse
Dim7 – axe 1	« Naturalité » (naturalité +)	Naturalité

3.2.2. Localisation des groupes de pixels similaires

L'ACP effectuée sur les coordonnées des pixels selon les quatorze axes résumés est présentée sur la Figure 7. Trois axes sont conservés au vu de l'ébouillement des valeurs propres (Figure 7 (a)).

Le premier axe est corrélé négativement à la quantité de biomasse et à la diversité alimentaire (respectivement Dim6 – axe1 et Dim5 – axe1), et positivement à l'indisponibilité en sol, à la naturalité et au cône de visibilité (Dim3 – axe2, Dim7 – axe1 et Dim1 – axe1). Les coefficients de corrélation sont de -0.94, -0.87, 0.78, 0.77, 0.74 respectivement.

Le second axe est corrélé positivement à l'enneigement, pour les difficultés d'accès et les conditions thermiques (Dim2 – axe1 et Dim3 – axe1), et négativement à l'appétence et à l'aspect visuel (Dim5 – axe2 et Dim4 – axe1). Les coefficients de corrélation sont de 0.93, 0.90, -0.90 et -0.74 respectivement. Un fort effet saisonnier est également présent sur cet axe (hiver côté positif, été côté négatif) (Figure 7 (b)).

Le troisième axe est corrélé négativement à la fourniture de caches et d'abris (Dim4 – axe3, coefficient de corrélation : -0.67) (Figure 7 (c)). Toutes ces corrélations sont largement significatives au seuil 0.01, les variables qui ne sont pas citées ont des coefficients de corrélation aux axes inférieurs à 0.65.

Certaines sous-dimensions sont sous-représentées dans la différenciation des pixels selon les trois axes conservés, avec un \cos^2 inférieur à 0.4 (le \cos^2 révèle la qualité de représentation). C'est le cas des sous-dimensions associées au temps d'accès aux pixels (Dim2 – axe2), et à leur instabilité géo-morphologique (Dim1 – axe3) (\cos^2 de 0.18 et 0.13 respectivement – Annexe 6).

⁴ Le nom court des sous-dimensions associées à Dim4 commence par l'abréviation *Immat*, pour *ressources immatérielles*. Ce nom se rattache néanmoins aux ressources *non consommables*, dont la définition est proche (IPBES 2019), mais dont l'abréviation était moins évidente.

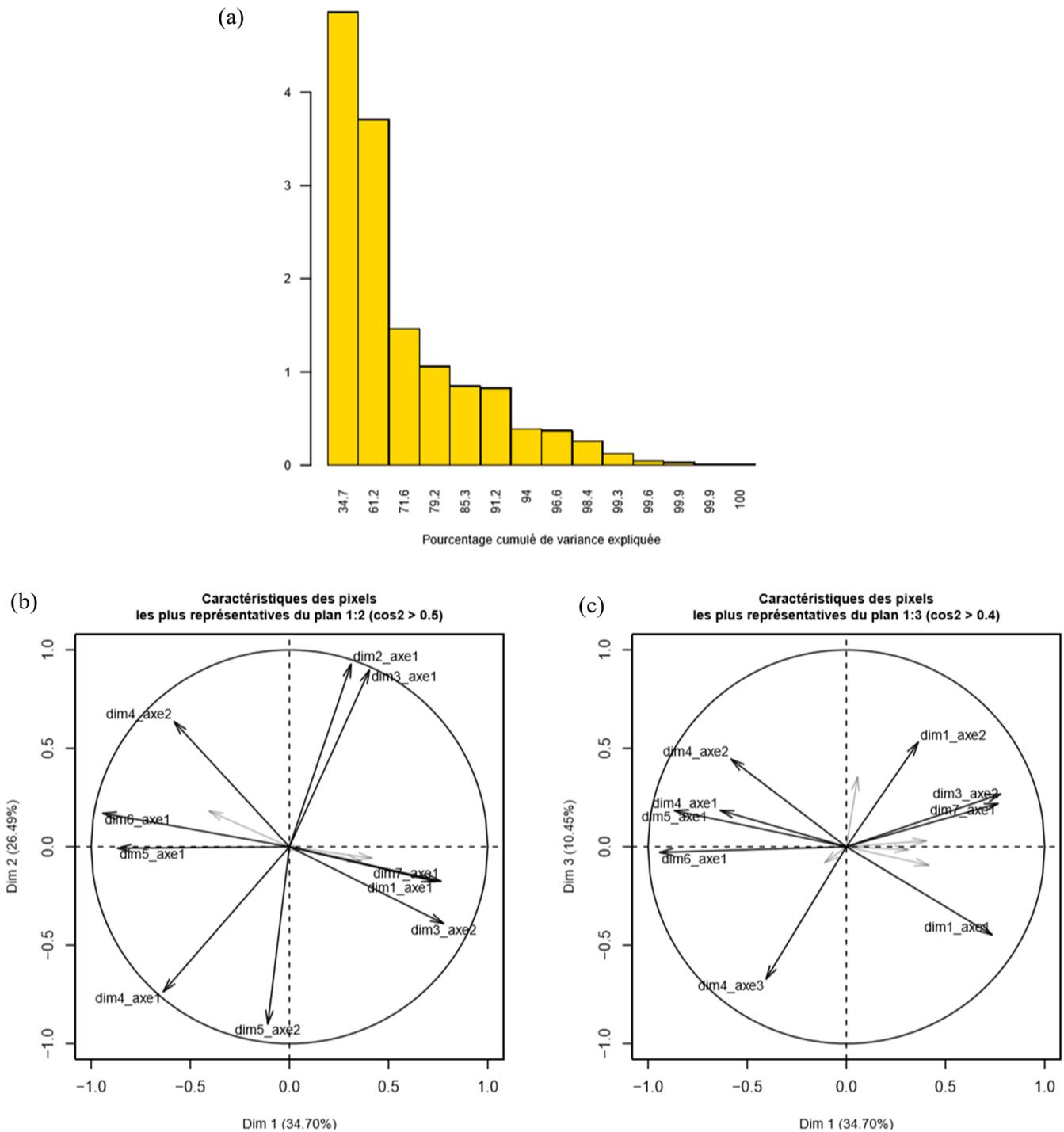


Figure 7 : Résultat de l'ACP appliquée au tableau de caractéristiques fonctionnelles des couples pixel-saison, tableau réduit en quatorze axes. (a) Eboulis des valeurs propres, avec le pourcentage cumulé de variance expliqué affiché sur l'axe des abscisses. Diagrammes circulaires des variables dans le plan principal 1:2 (b) et dans le plan 1:3 (c). Seules les variables les plus représentatives des plans sont affichées, selon un critère de \cos^2 . Les correspondances entre les noms $dimX_axeX$ et les variables sous-jacentes sont présentées dans le Tableau 14.

Les trois axes principaux sont rattachés à trois gradients de couleur, rouge, vert et bleu, combinés en un codage RVB, afin d'avoir une représentation cartographique des similarités de pixels. Les cartes ainsi obtenues, Figure 8 (a) pour l'hiver et (b) pour l'été, montrent clairement une distinction selon le deuxième axe de l'ACP (gradient vert, Figure 9 (c) et (d)), ce qui est également visible sur la Figure 8 (c) et à l'Annexe 7. Les différences saisonnières ne concernent pas ou peu les dimensions 1, 6 et 7

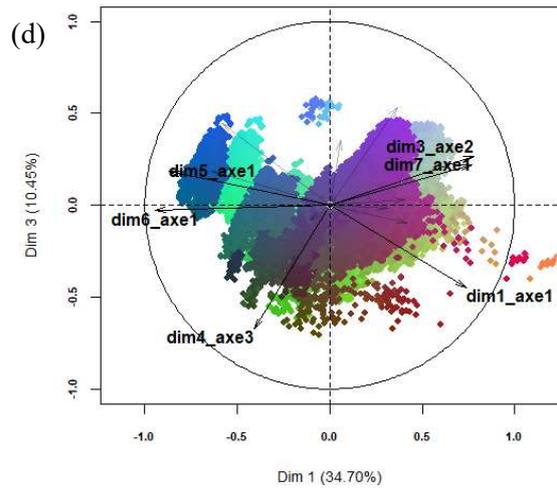
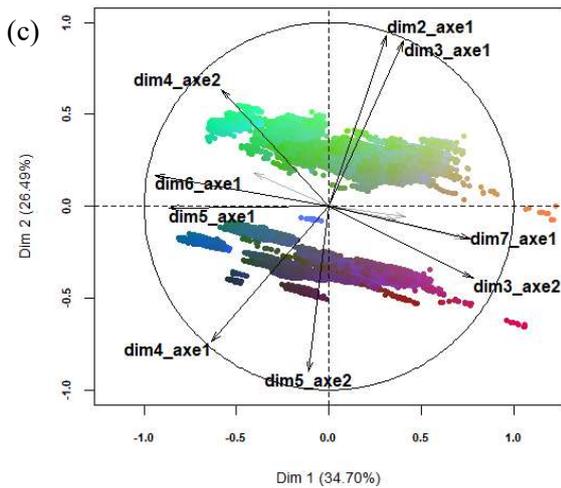
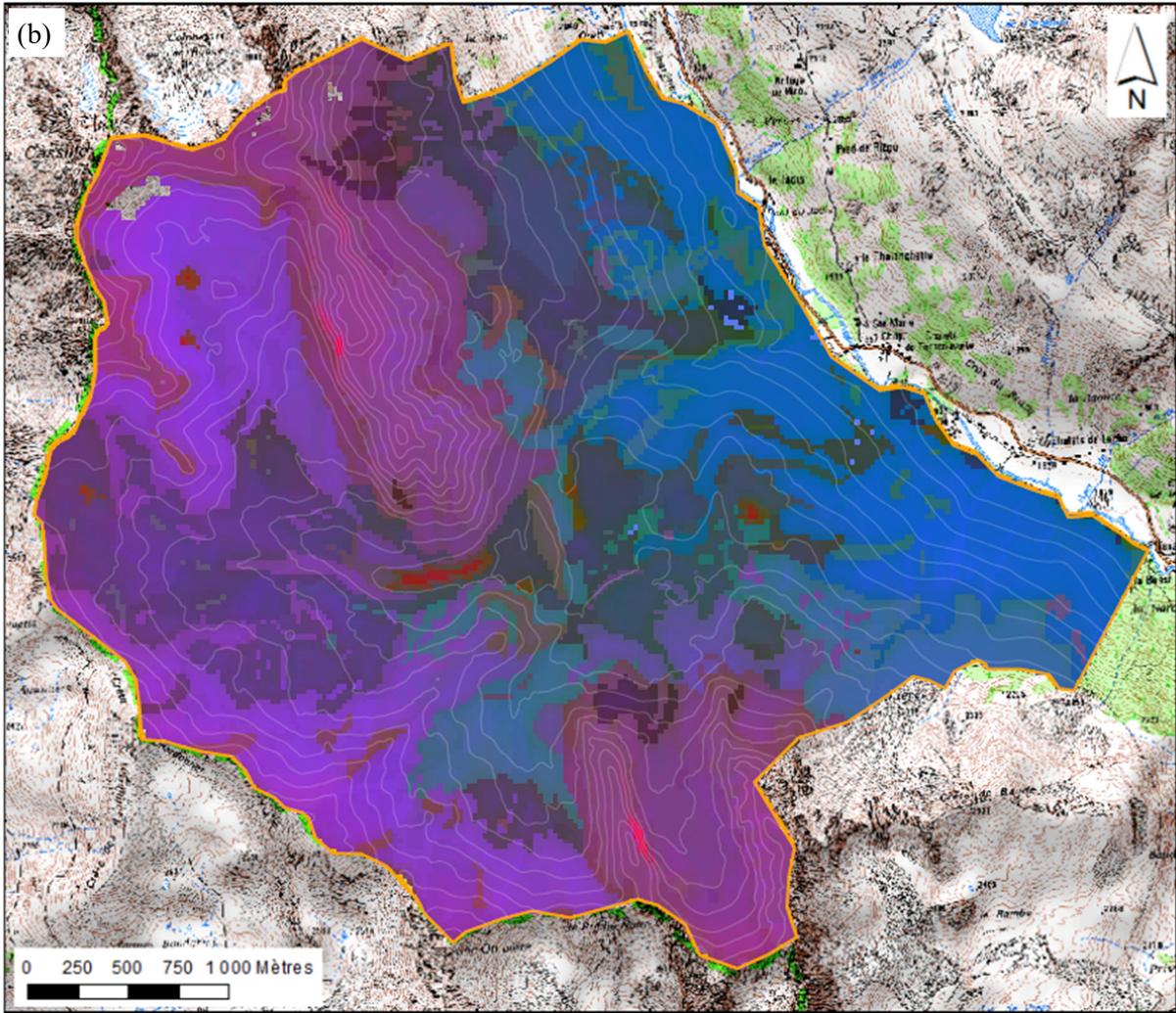


Figure 8 : Coloration des pixels de l'unité pastorale du Chardonnet selon leurs similarités en termes de caractéristiques fonctionnelles : coloration des pixels selon leurs caractéristiques hivernales (a) ou estivales (b). Les courbes de niveau sont à 50 m, le fond de carte est issu de l'IGN. Les couleurs correspondent au codage RVB selon les trois axes principaux de l'ACP appliquée au tableau de caractéristiques fonctionnelles des couples pixel-saison, tableau réduit en quatorze axes. La légende pour les couleurs utilisées est donc présentée sous la forme des diagrammes des variables de l'ACP, dans le plan 1:2 (c) et dans le plan 1:3 (d). Les correspondances entre les noms dimX_axeX et les variables sous-jacentes sont présentées dans le Tableau 14.

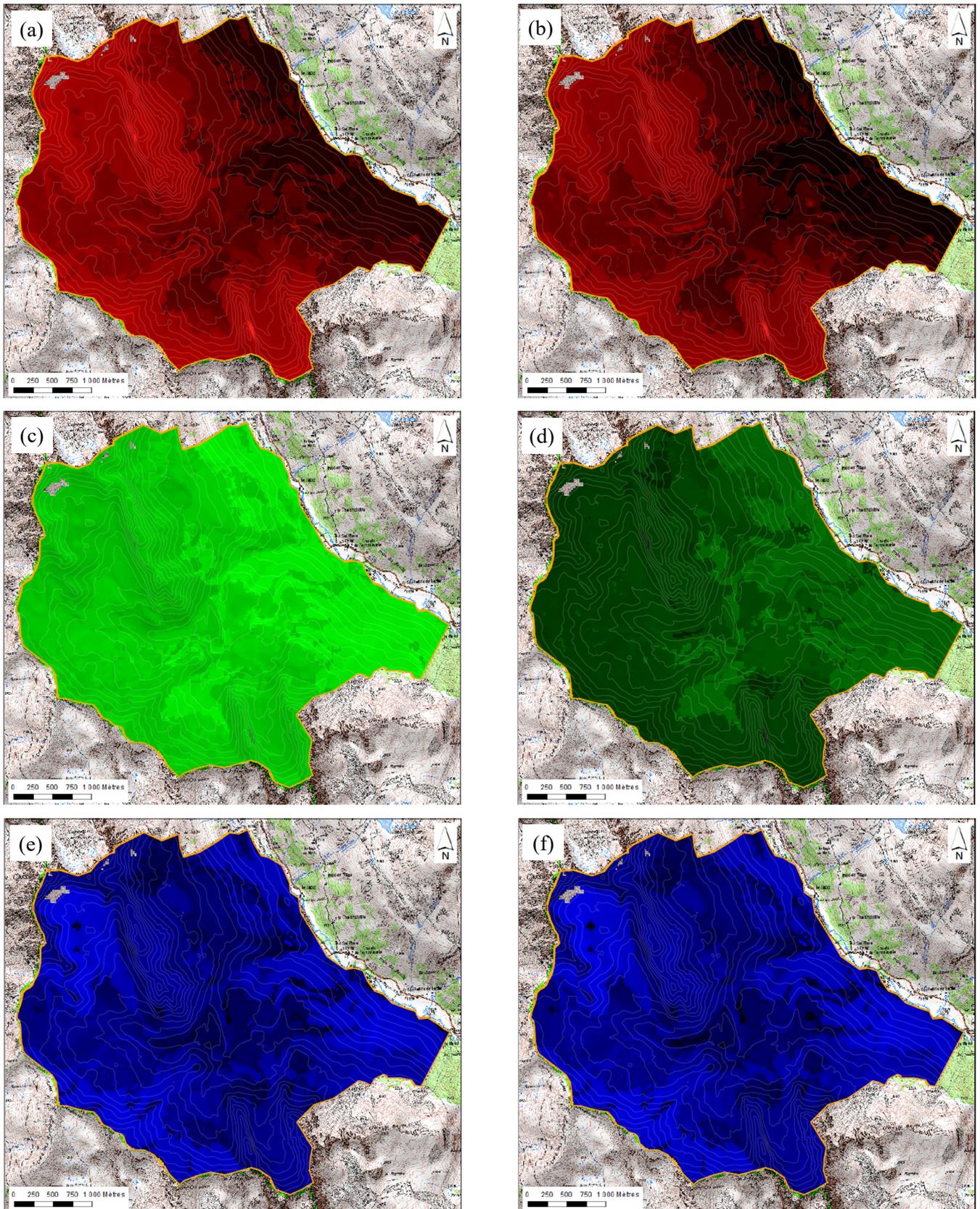


Figure 9 : Décomposition des images selon les bandes RVB, associées aux coordonnées des pixels sur les trois premiers axes de l'ACP (axe 1 rouge : a et b ; axe 2 vert : c et d ; axe 3 bleu : e et f). La colonne de gauche (a, c, e) correspond aux caractéristiques hivernales des pixels, la colonne de droite (b, d, f) à leurs caractéristiques estivales.

3.3. Discussion

3.3.1. Un cadre d'analyse qui permet de valoriser et d'intégrer une multitude de données de natures différentes

Le calcul d'ACP selon chaque dimension permet de dégager et interpréter les sous-dimensions importantes. La réduction de la base de données initiale à ces quatorze sous-dimensions est donc pratique et peut être réinvestie dans des analyses postérieures. Le retour aux variables initiales qui composent chacune des quatorze sous-dimensions peut néanmoins être nécessaire et pertinent pour les interprétations de résultats basés sur le tableau de données réduit.

Par ailleurs, le pourcentage de variance expliquée par les axes retenus sur chaque ACP est de 78 % en moyenne : la majeure partie de la variance du tableau de données initial est captée dans le tableau de données réduit. C'est pour les dimensions 3 et 6 que la réduction entraîne une perte plus importante de variance expliquée, puisque les axes retenus ne résument que 49 % et 45.5 % de la variance. Ces dimensions concernent les conditions géophysiques et la quantité de ressources, et les variables très peu corrélées aux axes retenus sont le rayonnement calculé via le modèle HELIOS, et le nombre de jours de gel sévère pendant la période de végétation (Annexe 4). Il est possible que les variables disponibles ne représentent pas assez bien les dimensions théoriques. Cela met éventuellement en évidence une limite dans le choix et la disponibilité des proxies pour décrire les dimensions théoriques.

En combinant les résultats des ACP sur chacune des sept dimensions, on obtient un cadre d'analyse à deux niveaux cohérent (un premier niveau avec les sept dimensions, un second niveau avec quatorze sous-dimensions). Ce cadre reste souple du point de vue des variables incluses : il pourrait être adapté *a posteriori*, par exemple pour des zones où d'autres usages sont présents. Il serait intéressant de voir à quel point l'ajout d'autres caractéristiques fonctionnelles dans la base de données modifierait le second niveau, ou si ces nouvelles caractéristiques s'intégreraient dans le cadre obtenu. L'application de la méthode à un autre site d'étude permettrait également de tester la robustesse du cadre proposé : les mêmes sous-dimensions ressortiraient-elles ?

3.3.2. L'apport de la méthode relativement aux cartographies d'habitats

Le fait de cartographier une grille de pixels (à 25 m) plutôt que des polygones permet d'avoir une mesure qui sera comparable dans le temps, et une précision comparable dans l'espace. Le lien entre les cartes de similitude fonctionnelle (Figure 8) et la carte des habitats Natura 2000 (Annexe 0 : Atlas cartographique et photographique) transparait légèrement, avec des colorations proches au sein d'un même type d'habitat, mais l'ajout de variables descriptives supplémentaires permet de raffiner la description des milieux des pixels situés dans un même polygone d'habitat Natura 2000. Par ailleurs, la proximité fonctionnelle entre un éboulis calcaire (habitat 8120) et une pente rocheuse calcaire (8210), ou entre un éboulis siliceux végétalisé (8110) et une pelouse à Nard (6230) est bien visible. Le gradient de couleur permet de comprendre selon quelle sous-dimension fonctionnelle deux pixels diffèrent.

Il est important de noter que la représentation RVB ne peut pas capter toutes les variations entre pixels, puisque seuls les trois axes principaux de l'ACP sont inclus dans la coloration : la différenciation des pixels selon leur temps d'accès et leur instabilité géomorphologique est ainsi mal représentée. Cette limite serait dépassée par la prise en compte de toutes les dimensions, par exemple en calculant les similitudes et divergences entre pixels : il faudrait pour cela calculer une matrice de distance, ce qui est lourd pour de larges jeux de données (matrices de taille $n \times n$ avec n le nombre de

pixels). Une telle méthode permettrait éventuellement de déterminer des groupes fonctionnels de pixels similaires. La réduction en 3 dimensions puis visualisation cartographique en RVB est moins limitée par les besoins computationnels, mais ne fournit qu'une information partielle, visuelle, de la proximité fonctionnelle entre pixels.

4. Détermination des niches d'usage

L'objectif est ici de relier chaque usage aux caractéristiques fonctionnelles du milieu, afin d'obtenir des « niches d'usage », selon un principe similaire à la modélisation des niches écologiques des espèces à partir de données de présence (Guisan, Zimmermann 2000). Cette partie permet donc de développer la question (2) présentée en introduction : de quoi dépend chaque activité / usage, en termes de caractéristiques biophysiques du milieu ?

4.1. Méthode mise en place

4.1.1. Construction de la base de données d'usages

Comme indiqué aux paragraphes 1.1. et 1.2.3. , certains usages ne sont pas étudiés : ceci dépend de leur ampleur spatiale et de la disponibilité des données. L'intensité supposée des usages est également prise en compte puisque, pour les usages associés aux services écosystémiques de production, nous avons considéré que la cueillette de champignons ou de plantes sauvages (gentiane et génépi pour les liqueurs, ortie, etc.) n'était qu'anecdotique et difficile à cartographier : nous ne l'avons pas incluse dans l'analyse. C'est le cas aussi pour l'exploitation forestière, puisque la productivité est relativement faible et la gestion paysagère des parcelles est privilégiée. Les usages finalement intégrés et les données utilisées sont présentés dans cette partie.

4.1.1.1. Les usages animaux (non domestiques)

Les animaux considérés ici sont ceux dont la surface du domaine vital est comprise dans la fourchette définie au paragraphe 1.2.3. Les cartographies correspondantes sont visibles en Annexe 0 : Atlas cartographique et photographique.

Les bases de données de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS) et de l'Observatoire des Galliformes de Montagne (OGM) sont disponibles sur le portail en ligne Carmen (OFB, http://carmen.carmencarto.fr/38/Ongules_sauvages.map# ; Observatoire des Galliformes de Montagne, <http://carmen.carmencarto.fr/85/>). Les données téléchargées sont la version 2017 des aires de présence du mouflon méditerranéen, du chamois, et du bouquetin des Alpes, et la version 2015 pour le cerf élaphe. Pour les galliformes, ce sont des données de présence / absence par unité naturelle, à l'état réalisé en 2010 pour le tétras-lyre, la perdrix bartavelle, et le lagopède alpin. Ainsi on affecte la valeur 1 au pixel s'il est situé dans une zone de présence de l'espèce considérée, et 0 sinon. Il faut garder à l'esprit le fait que ces données sont peu précises : les zones de présence peuvent être relativement larges alors que les zones d'utilisation effective de l'espace sont plus restreintes.

A ces données s'ajoutent les informations acquises lors des suivis liés au site Natura 2000. Les crottiers de tétras-lyre sont cartographiés sur le terrain régulièrement selon le protocole de la Fédération Départementale des Chasseurs de l'Isère et de l'ONCFS, 2014. Les relevés de l'hiver 2017-2018 sont utilisés ici, et le nombre de crottiers situés sur chaque pixel de 25 m est compté. Des zones tampon de 100 m autour des crottiers relevés permettent d'obtenir une cartographie des zones d'hivernage du tétras-lyre (Fédération Départementale des Chasseurs de l'Isère, ONCFS 2014). Par ailleurs une cartographie des zones de nidification des galliformes existe sur le site Natura 2000, réalisée à dire d'expert. A chaque pixel est affectée la valeur 1 s'il est situé dans la zone de nidification du galliforme considéré, 0 sinon.

4.1.1.2. L'usage pastoral

L'unité pastorale n'est pas pâturée dans sa totalité : certaines zones sont évitées parce qu'elles sont considérées par le berger comme inaccessibles ou à faible intérêt pastoral. Un entretien du berger,

Roger Minard, a permis de délimiter ces zones non visitées par le troupeau. Là encore il faut garder à l'esprit le manque de précision de ces données : le troupeau peut divaguer dans certaines zones identifiées comme non visitées par le berger qui n'a pas conduit les bêtes vers ces zones, et le troupeau peut au contraire éviter ou seulement traverser certains espaces sans s'y attarder et pâturer vraiment.

Les zones de couchades, où le troupeau chaume et stagne dans une zone délimitée par des filets, sont également localisées : elles sont considérées comme un usage annexe aux simples pâtures. En début et fin de saison (juin-début juillet et septembre), le berger laisse le troupeau en « couchades tournantes ». Pour les autres périodes, les six couchades utilisées alternativement ont été situées par le berger, et les photographies aériennes de *Google Earth* permettent une localisation plus précise. Les cartographies correspondantes sont visibles en Annexe 0 : Atlas cartographique et photographique. A chaque pixel est attribuée la valeur 1 s'il est situé dans un des parcs de couchade, et 0 sinon.

4.1.1.3. Les usages récréatifs

Les usages récréatifs sont évalués à partir des chemins et itinéraires extraits des bases de données présentées dans le paragraphe 2.2.5. Les chemins sont des linéaires où l'usage est fortement probable mais pas avéré : il se peut que certains sentiers de la BD TOPO® de l'IGN (IGN 2019) ne soient pas ou plus utilisés dans les faits, et que de nouveaux chemins aient été créés par des passages répétés. Les itinéraires de ski de randonnée extraits de *Camptocamp* correspondent au contraire à des usages effectifs, puisque les skieurs entrent les caractéristiques et traces GPS de leurs sorties sur l'interface *Camptocamp*.

La base de données associée au site web de partage d'images *Flickr* permet également de cartographier des usages récréatifs effectifs, puisque cette base regroupe des photographies géo-localisées. Les images en elles-mêmes n'ont pas été consultées, et aucun filtre lié à la prise de vue n'a été appliqué : les géo-localisations peuvent donc correspondre à des photographies d'éléments naturels (paysages, fleurs, animaux) mais aussi à des photographies de personnes, d'animaux de compagnie, etc. Les données *Flickr* révèlent donc des points de présence, présence très probablement liée à l'usage récréatif. Ces données ont été obtenues via une collaboration avec François Guilhaumon (MARBEC, IRD Montpellier) et Maxime Lenormand (TETIS, INRAE Montpellier). Les événements multiples ont été préalablement filtrés (ex. plusieurs prises de vues au même endroit dans un temps limité ont été regroupées). Est utilisée ici seulement la base de données d'événements, enregistrés entre 2008 et 2018, sur l'alpage du Chardonnet.

Les cartographies correspondantes sont visibles en Annexe 0 : Atlas cartographique et photographique.

Le tableau d'usages obtenu est finalement transformé en présence / absence des usages.

4.1.2. Modélisation des niches d'usage et évaluation des modèles obtenus

Le lien entre usage et caractéristiques fonctionnelles est étudié via deux familles de modèles : la régression logistique, avec les modèles linéaires généralisés (abrégés GLM par la suite), et les algorithmes d'apprentissage, avec les arbres aléatoires (*random forests*, abrégés RF par la suite). Ces deux approches sont bien différentes puisque la première modélise la probabilité de présence de l'usage suivant des fonctions connues (modélisation paramétrique) : on suppose que la probabilité est une fonction polynomiale des variables explicatives, les courbes de réponse sont donc contraintes. La seconde méthode au contraire est non paramétrique, la présence de l'usage est prédite sans présupposé théorique, seulement à partir des cas rencontrés dans la base de données de calibration : ces cas permettent à l'algorithme d'apprendre quelles variables explicatives sont plutôt liées à la présence de

l'usage ou à son absence. Ainsi la première méthode ajoute de l'information (hypothèse sur la forme de la réponse), peut permettre de se défaire du « bruit » qui pourrait masquer des courbes de réponses polynomiales, et les tendances dégagées basées sur des courbes théoriques « classiques » ont une portée générale. La seconde méthode permet de dégager des tendances au plus proche des données du cas étudié.

Les usages sont considérés en présence / absence, avec le code 1 pour la présence et 0 pour l'absence. La base de données pixel par pixel est utilisée, et les caractéristiques fonctionnelles sont les quatorze axes qui résument la base de données initiale ('tableau des caractéristiques fonctionnelles des pixels réduit' sur la Figure 6). Ceci limite le nombre de variables potentiellement explicatives. Les variables potentiellement explicatives correspondent aux sous-dimensions détaillées dans le Tableau 14, et sont notées *DimX_axeX*.

Pour les GLM, la probabilité de présence de l'usage est modélisée avec une loi binomiale. Les termes simples et quadratiques sont intégrés aux modèles. Le meilleur modèle est déterminé par ajout et retrait de variables explicatives en cherchant à améliorer l'*AIC*, avec la méthode *step* bi-directionnelle du package *gam* sous R (Hastie 2019). Pour les RF, les paramètres par défaut du package *randomForest* sont utilisés (Liaw, Wiener 2002).

Ces deux méthodes (GLM et RF) sont appliquées à chaque usage et chaque saison (variables à expliquer), sur 70 % des pixels de la base de données, tirés aléatoirement. Ces 70 % correspondent à la base de données de calibration. Pour évaluer les résultats, les modèles obtenus sont appliqués aux 30 % restants de la base de données (jeu de données de validation), et la prédiction d'usage est comparée aux observations. Cette comparaison permet de calculer le *TSS* (*True Skill Statistic*), le *kappa de Cohen*, et l'*AUC* (*Area Under Curve*), qui sont des métriques couramment utilisées pour évaluer les modèles de distribution en écologie, et ont chacune leurs avantages et inconvénients (métrique la plus utilisée mais dépendance à la prévalence pour le *kappa*, indépendance au choix d'un seuil et à la prévalence mais sensibilité forte aux fausses absences pour l'*AUC*, indépendance à la prévalence mais dépendance au choix d'un seuil pour le *TSS* (Allouche et al. 2006 ; Shabani et al. 2018)). La qualité des modèles est également évaluée en les comparant aux modèles nuls, c'est-à-dire aux modèles calculés à partir de variables explicatives aléatoires, obtenues par ré-échantillonnage au hasard de chaque colonne du tableau des caractéristiques fonctionnelles réduit. Les indicateurs de comparaison utilisés sont le gain relatif d'*AIC* (*Akaike Information Criterion*), le test de *chi-2* de comparaison des déviations, les *pseudo R²* (différentes définitions utilisées : *R²* de Mc Fadden, *R²* de Nagelkerke, *R²* de Cox-Snell), et la statistique de Tjur, ou coefficient de discrimination (Allison, 2013 ; Tjur, 2009). Les indicateurs utilisés et leur formule de calcul sont présentés dans le tableau en Annexe 8.

L'utilisation de plusieurs métriques d'évaluation permet d'avoir une meilleure idée des performances des modèles. Ceci permet également d'avoir à la fois les mesures les plus classiques, et des mesures valables pour les deux familles de modèles. Le tirage aléatoire de 70 % de la base de données et l'évaluation des modèles obtenus sont effectués dix fois, les résultats étant ensuite moyennés entre les dix répétitions.

4.1.3. Evaluation de la participation des variables explicatives dans chaque modèle

Pour évaluer l'importance des variables et leur participation à chacun des modèles, la méthode utilisée s'inspire de celle proposée dans le package *R BIOMOD* (Thuiller et al. 2009). Cette méthode présente l'avantage d'être applicable aux deux types de modèles, GLM et RF. Le modèle est appliqué à la base de données initiale d'une part, et à la base de données où la variable dont l'importance est évaluée est ré-échantillonnée aléatoirement d'autre part. Les deux prédictions de probabilité obtenues sont comparées via leur coefficient de corrélation. Ainsi un coefficient de corrélation important signifie que

la variable source apporte autant d'information que la variable randomisée, et donc qu'elle participe peu au modèle. Au contraire, une corrélation faible signe une participation forte de la variable au modèle. Le score d'importance, ou de participation, $S_{participation}$ est donc donné par :

$$S_{participation} = 1 - cor(Pred_{brute}, Pred_{var\ randomisée}).$$

Ces scores sont ensuite remis à la même échelle, entre 0 et 100, pour les modèles GLM et RF. Un seuil de $S_{participation}$, fixé à 50, permet de cibler les variables les plus importantes pour les deux types de modèles, et ainsi de visualiser leur convergence ou non. Un score global peut aussi être calculé en sommant les scores de participation GLM et RF de chaque variable pour chaque usage. Le score global maximal est alors de 200.

4.1.4. Comparaison des modèles obtenus à des modèles plus « simples », basés uniquement sur l'habitat Natura 2000

L'apport de la méthode est évalué en comparant les modèles obtenus avec pour variables explicatives les quatorze axes présentés dans la partie 3.2.1. , aux modèles obtenus avec seulement l'habitat Natura 2000 dominant comme variable explicative. Les modèles GLM et RF sont calculés, ainsi que les mêmes indicateurs d'évaluation (Annexe 8).

4.2. Résultats

4.2.1. Résultats généraux pour les modèles de niche d'usage

Les modèles obtenus ont des scores relativement bons (Tableau 15). Les indicateurs d'évaluation sont meilleurs pour les modèles RF par rapport aux modèles GLM (gain de 0.37 points pour l'indicateur de Tjur, 0.18 points pour TSS, 0.21 points pour Kappa, 0.06 points d'AUC).

Tableau 15: Scores moyens des modèles d'usage (20 usages modélisés)

	<i>LRtest</i>	<i>McFadden R2</i>	<i>Nagel R2</i>	<i>CoxSnell R2</i>	<i>Tjur</i>	<i>Gain AIC</i>	<i>TSS</i>	<i>Kappa</i>	<i>AUC</i>
GLM	<0.01	0.53	0.61	0.37	0.50	0.52	0.70	0.55	0.90
RF	-	-	-	-	0.87	-	0.89	0.76	0.96

Pour l'ensemble des usages étudiés, les indicateurs d'évaluation sont meilleurs pour les modèles complets par rapport aux modèles où seul l'habitat Natura 2000 est utilisé comme variable explicative. Pour les GLM, 0.2 points sont gagnés en moyenne sur les pseudo R^2 (gain de 46 % environ). 0.2 points sont également gagnés pour le TSS et le Kappa de Cohen (31 et 42 % respectivement), et 0.1 point d'AUC (11 %). L'amélioration est plus marquée pour les RF, avec 0.6 points en moyenne pour le R^2 de Tjur (gain de 71 %), 0.6 de TSS, 0.5 de Kappa et 0.3 points d'AUC (71 %, 67 % et 32 % respectivement – Annexe 10).

4.2.2. Spécificités des modèles d'usage obtenus

Qualité et capacité prédictive des modèles

Les modèles les moins bons concernent les usages récréatifs, et notamment ceux révélés par la prise de photographies (pseudo R^2 inférieurs à 0.2). La modélisation des zones de nidification de la perdrix bartavelle est également moins bonne, mais cela n'apparaît pas avec tous les indicateurs d'évaluation (R^2 de Mc Fadden et de Nagelkerke supérieurs à 0.4, mais R^2 de Cox-Snell inférieur à 0.1). Les

meilleurs modèles concernent les domaines de présence des ongulés et galliformes (tétrasyre, perdrix bartavelle, cerf, mouflon, bouquetin, par ordre d'indicateur décroissant pour les GLM et l'indicateur de Tjur) (Tableau 16 et Annexe 10)

Score d'importance des variables explicatives

Les modèles RF et GLM ne convergent pas totalement au niveau de l'importance de chaque variable (les ellipses jaune et verte ne sont que partiellement superposées dans le Tableau 16).

Les usages par les galliformes sont déclinés en aire de présence globale, en zone de nidification, voire en zone d'hivernage pour le tétrasyre. Dans ces cas-là il est intéressant de noter que certaines variables sont importantes pour l'ensemble des usages d'une même espèce, alors que d'autres variables explicatives ne sont importantes que pour une partie des usages d'une espèce. Par exemple, la naturalité (Dim7 – axe1) ressort pour les domaines de présence en été et en hiver du tétrasyre, ainsi que pour les zones de nidification et d'hivernage, avec des scores globaux de 122, 78, 76 et 113 respectivement, et la probabilité d'usage tend à décroître avec l'augmentation de la naturalité. Au contraire, la diversité alimentaire (Dim5 – axe1) importe beaucoup pour l'hivernage, avec un score global de 89, mais peu pour la nidification du tétrasyre, avec un score de 21 (Tableau 16 et Annexe 10).

*Tableau 16 : Résultats des modélisations de présence/absence des usages, hivernaux (deux colonnes de gauche) ou estivaux (deux colonnes de droite), basés sur les caractéristiques fonctionnelles des pixels résumées en 14 sous-dimensions. Les résultats des modèles logistique (GLM) et d'apprentissage (Random Forest RF) sont affichés sur fond vert ou jaune respectivement. Parmi les indices d'évaluation de la qualité des modèles, seul le **R² de Tjur** est présenté dans ce tableau (les autres scores sont disponibles en Annexe 10). Il permet de comparer les performances des GLM et des RF, ainsi que les performances des modèles incluant les 14 sous-dimensions (modèle « global ») par rapport à ceux n'incluant que l'habitat Natura 2000 dominant sur le pixel (modèle « N2000 »). C'est le nom court de ces 14 sous-dimensions, ou variables, qui est affiché : le nom détaillé est visible dans le Tableau 14. Seules les variables dont le **score d'importance** dans le modèle est supérieur à 50 sont affichées dans les ellipses : ces figures permettent donc de voir la convergence ou non des deux types de modèles, RF ou GLM. Lorsque le score cumulé (RF + GLM) est supérieur à 100, les variables sont notées en gras, et elles sont en italique sinon. Les **courbes de réponse** (probabilité de présence de l'usage en fonction des variables explicatives) sont affichées à droite des variables explicatives qui ressortent dans les modèles, lorsque ces courbes présentent des tendances marquées (croissance, décroissance, ou courbe en cloche) : elles ne sont donc pas affichées lorsqu'elles paraissent très bruitées (cas des RF notamment, pour lesquels les probabilités ne sont pas lissées).*

		<p>Usage pastoral – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.48</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.93</td> <td>0.42</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.48	0.30	RF	0.93	0.42										
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.48	0.30																			
RF	0.93	0.42																			
		<p>Usage pastoral : couchades – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.24</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.73</td> <td><0.001</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.24	0.005	RF	0.73	<0.001										
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.24	0.005																			
RF	0.73	<0.001																			
<p>Usage récréatif saisonnier lié aux itinéraires – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.05</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.71</td> <td>0.004</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.05	0.03	RF	0.71	0.004		<p>Usage récréatif saisonnier lié aux itinéraires – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.06</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.69</td> <td><0.001</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.06	0.03	RF	0.69	<0.001	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.05	0.03																			
RF	0.71	0.004																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.06	0.03																			
RF	0.69	<0.001																			

<p>Usage récréatif saisonnier révélé par les photographies Flickr – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.03</td> <td><0.001</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.61</td> <td><0.001</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.03	<0.001	RF	0.61	<0.001		<p>Usage récréatif saisonnier révélé par les photographies Flickr – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.02</td> <td>0.009</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.62</td> <td><0.001</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.02	0.009	RF	0.62	<0.001	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.03	<0.001																			
RF	0.61	<0.001																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.02	0.009																			
RF	0.62	<0.001																			
<p>Domaine de vie annuel du bouquetin – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.47</td> <td>0.27</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.92</td> <td>0.36</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.47	0.27	RF	0.92	0.36		<p>Domaine de vie annuel du bouquetin – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.51</td> <td>0.27</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.93</td> <td>0.36</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.51	0.27	RF	0.93	0.36	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.47	0.27																			
RF	0.92	0.36																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.51	0.27																			
RF	0.93	0.36																			
<p>Domaine de vie annuel du mouflon – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.60</td> <td>0.35</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.95</td> <td>0.45</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.60	0.35	RF	0.95	0.45		<p>Domaine de vie annuel du mouflon – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.62</td> <td>0.35</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.96</td> <td>0.45</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.62	0.35	RF	0.96	0.45	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.60	0.35																			
RF	0.95	0.45																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.62	0.35																			
RF	0.96	0.45																			
<p>Domaine de vie annuel du cerf – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.69</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.95</td> <td>0.46</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.69	0.33	RF	0.95	0.46		<p>Domaine de vie annuel du cerf – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.69</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.96</td> <td>0.46</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.69	0.33	RF	0.96	0.46	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.69	0.33																			
RF	0.95	0.46																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.69	0.33																			
RF	0.96	0.46																			

<p>Domaine de vie annuel du tétras – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.94</td> <td>0.53</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.98</td> <td>0.58</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.94	0.53	RF	0.98	0.58		<p>Domaine de vie annuel du tétras – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.92</td> <td>0.53</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.98</td> <td>0.58</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.92	0.53	RF	0.98	0.58	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.94	0.53																			
RF	0.98	0.58																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.92	0.53																			
RF	0.98	0.58																			
<p>Zone d'hivernage du tétras – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.40</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.86</td> <td>0.008</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.40	0.12	RF	0.86	0.008		<p>Zone de nidification (été) du tétras – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.75</td> <td>0.52</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.94</td> <td>0.73</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.75	0.52	RF	0.94	0.73	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.40	0.12																			
RF	0.86	0.008																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.75	0.52																			
RF	0.94	0.73																			
<p>Domaine de vie annuel de la perdrix bartavelle – caractéristiques hivernales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.83</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.95</td> <td>0.33</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.83	0.33	RF	0.95	0.33		<p>Domaine de vie annuel de la perdrix bartavelle – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.85</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.96</td> <td>0.33</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.85	0.33	RF	0.96	0.33	
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.83	0.33																			
RF	0.95	0.33																			
R ² Tjur	Global	N2000																			
GLM	0.85	0.33																			
RF	0.96	0.33																			

		<p>Zone de <u>nidification</u> (été) de la perdrix bartavelle – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.22</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.81</td> <td><0.001</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.22	0.06	RF	0.81	<0.001	
R ² Tjur	Global	N2000										
GLM	0.22	0.06										
RF	0.81	<0.001										
		<p>Zone de <u>nidification</u> (été) du lagopède – caractéristiques estivales</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R² Tjur</th> <th>Global</th> <th>N2000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GLM</td> <td>0.59</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>RF</td> <td>0.92</td> <td>0.004</td> </tr> </tbody> </table>	R ² Tjur	Global	N2000	GLM	0.59	0.28	RF	0.92	0.004	
R ² Tjur	Global	N2000										
GLM	0.59	0.28										
RF	0.92	0.004										

4.2.3. Focus sur l'usage pastoral

Nous nous intéressons ici aux zones de couchades, c'est-à-dire là où le troupeau chaume et stagne dans une zone délimitée par des filets. Pour cet usage ce sont les conditions d'accès aux pixels qui priment, mais le modèle n'explique qu'une part limitée de la variance (R^2 de Tjur à 0.24 et 0.73 pour les modèles GLM et RF respectivement, contre 0.50 et 0.87 en moyenne pour tous les modèles – Tableau 16 et Annexe 10) : ceci suggère que d'autres variables explicatives seraient pertinentes. La comparaison spatiale des zones d'utilisation potentielles, prédites par le modèle, avec les zones d'utilisation effective, est présentée sur la Figure 10.

Le modèle RF prédit toutes les zones d'utilisation effective, alors que le modèle GLM n'en prédit que deux sur six (les deux plus grandes, A et B sur la Figure 10. Voir aussi Annexe 11). Les pixels propices à des couchades ne concordent pas toujours entre les prédictions des modèles GLM et RF (131 pixels prédits seulement par RF, 131 prédits seulement par GLM) : le modèle GLM prédit les zones de couchades n°2, 3 et 4, avec des pixels groupés, alors que le modèle RF renvoie des pixels potentiels assez éparpillés. La zone n°1 correspond à des pixels prédits par les deux modèles, mais qui ne se superposent pas. Les deux modèles concordent néanmoins pour 35 des pixels effectivement utilisés et pour 70 pixels potentiels (et 24325 pixels non utilisés). Ces pixels potentiels sont principalement situés autour des deux plus grandes couchades (les plus au nord), mais on trouve également quatre pixels communs sur la zone n°5 (Figure 10).

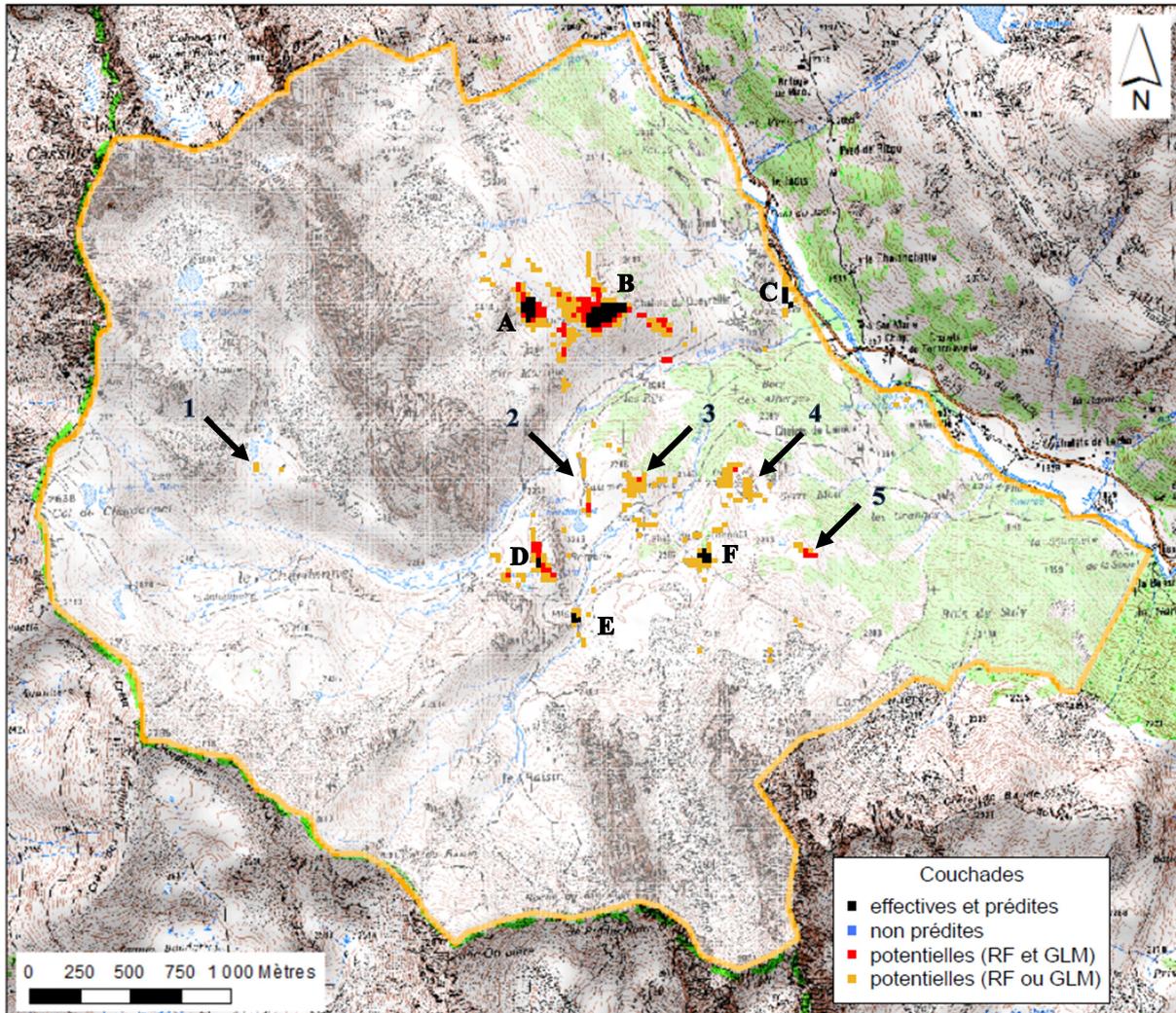


Figure 10 : Comparaison des zones de couchades effectives et prédites par les modèles (dites "potentielles"). Les seuils de probabilité de présence de l'usage sont choisis de sorte que les zones d'utilisation potentielle soient quatre à cinq fois plus grandes que les zones d'utilisation effective : seuil à 0.05 pour le modèle GLM, 0.015 pour le modèle RF.

Les lettres A à F permettent d'identifier les couchades existantes. Les flèches numérotées mettent en évidence cinq zones dont les caractéristiques pourraient convenir pour des couchades, mais qui ne sont pas utilisées dans les faits. Des hypothèses explicatives sont proposées au paragraphe 4.3.

4.3. Discussion

4.3.1. Des écarts entre hypothèses initiales et modèles obtenus : trois exemples

Bien que l'évaluation des modèles soit satisfaisante, les courbes de réponses selon chacune des variables explicatives (Tableau 16) ne sont pas toujours en accord avec les variations attendues, présentées dans le tableau des hypothèses en Annexe 9. Trois exemples sont développés ci-après, le premier se focalisant sur une dimension (Dim2, l'accessibilité), le deuxième sur une sous-dimension (Dim4 – axe1, l'aspect visuel local lié à la floraison et à la neige), et le troisième sur un usage en particulier (la nidification du lagopède).

- Exemple de la dimension liée à l'accessibilité (sous-dimensions *Acces_Temps* et *Acces_Neige*)

Les deux sous-dimensions liées à l'accessibilité sont des variables explicatives importantes pour tous les usages humains, et les deux familles de modèles convergent sur ce point. Cela était attendu pour les usages récréatifs, mais l'était moins pour l'usage pastoral, supposé lié davantage à la ressource alimentaire. Lors de l'entretien du berger, il a indiqué que les secteurs du Haut Chardonnet, de la Casse Blanche et de la Grande Manche combinaient faible intérêt pastoral, couvert très minéral et accès plus difficile. Les modèles révèlent la prépondérance du troisième effet. Le fait que la sous-dimension *Acces_Neige* ressorte suggère que l'accès aux ressources du pixel elles-mêmes est aussi important : une couche de neige est une barrière physique entre la végétation et l'herbivore, et la durée d'abrutissement potentiel est réduite pendant la saison d'été.

- Exemple de l'aspect visuel local (sous-dimension *Immat_Visuel*)

L'aspect visuel local (*Immat_Visuel*, Dim4 – axe1) est une sous-dimension qui ressort davantage que ce qui était supposé : son score d'importance est supérieur à 50/100 pour les zones de nidification et d'hivernage des galliformes, le domaine de vie des ongulés, et les zones de couchades, alors que seuls les usages récréatifs estivaux étaient supposés dépendre de cette sous-dimension. D'après le paragraphe 3.2.1. , ce sont l'enneigement (hauteur de neige moyenne sur la saison) et l'aspect fleuri et coloré de la végétation qui sont inclus dans Dim4 – axe1 : on peut supposer que ces variables sont corrélées à autre chose que les ressources non consommables (dimension 4). La quantité moyenne de neige est liée à la durée de végétation et, avec la floraison, Dim4 – axe1 peut être rattachée à la phénologie de la végétation. Cette dernière joue sur la qualité nutritive des végétaux, et donc sur les herbivores domestiques (Lavorel et al. 2011) et sauvages (ONCFS, <http://www.oncfs.gouv.fr/>). Ceci peut révéler un biais lié à l'utilisation de proxys, ou suggérer des ajustements dans l'attribution des variables à une ou plusieurs dimensions.

- Exemple des zones de nidification du lagopède alpin

Pour les zones de nidification du lagopède, les hypothèses initiales sont :

- *Hyp.1* - une augmentation de la probabilité d'usage avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité
- *Hyp.2* - une diminution de la probabilité d'usage avec l'homogénéité locale en habitats, sachant que le lagopède préfère les milieux en mosaïque, entre landes, végétation rase et éléments minéraux sources d'abris
- *Hyp.3* - une diminution de la probabilité d'usage avec l'absence de caches et d'abris minéraux, et avec les expositions plus chaudes (préférence pour les expositions fraîches et ombragées : abri topographique)
- *Hyp.4* - une augmentation de la probabilité d'usage avec la diversité alimentaire, pour l'élevage des jeunes une fois les œufs éclos (consommation d'herbacées, de feuilles, de fleurs, de fruits, et de petits invertébrés pour les jeunes)
- *Hyp.5* - une diminution de la probabilité d'usage avec la stratification verticale de la végétation, étant donné que la nidification s'effectue en strate rase parsemée de rochers (ONCFS, <http://www.oncfs.gouv.fr/>)

D'après les modèles, pour la nidification du lagopède, on trouve :

- *Mod.1* - une augmentation puis une diminution de la probabilité d'usage avec la quantité de biomasse disponible, avec un optimum pour une quantité intermédiaire
- *Mod.2* - une augmentation de la probabilité d'usage avec la diminution de l'énergie thermique disponible
- *Mod.3* - une augmentation de la probabilité d'usage avec le nombre de strates de végétation
- *Mod.4* - une augmentation puis une diminution de la probabilité d'usage avec le temps d'accès, avec un optimum pour des temps d'accès intermédiaires

La première hypothèse (*Hyp.1*) est partiellement validée d'après *Mod.4*, qui suggère en plus que les zones très peu accessibles, comme les falaises, ne sont pas propices à la nidification. L'hypothèse 3 (*Hyp.3*) concernant les expositions fraîches est validée par *Mod.2*. Pour *Hyp.5*, liée à *Mod.3*, on peut supposer que bien que le nid du lagopède soit en strate rase, un milieu avec davantage de strates est plus favorable aux jeunes, une fois les œufs éclos, puisque la stratification peut protéger les poussins des prédateurs éventuels ; ceci rejoint également *Hyp.4*, puisqu'un milieu avec plus de strates peut héberger davantage d'invertébrés (Conservatoire Rhône-Alpes des espaces naturels et al. 2010). Cependant une densité verticale trop importante, comme en forêt, ne serait pas propice à la nidification du lagopède : c'est ce qui est suggéré par *Mod.1*. Le fait que le contexte fonctionnel (Dim1 – axe2, *Hyp.2*) ne soit pas une variable importante d'après les modèles peut être lié à la définition des variables sous-jacentes : la proportion d'habitats similaires autour des pixels est calculée dans un rayon de 500 m (i.e. 80 ha), et la diversité locale en habitats est définie pour une zone d'1 ha. Une poule de lagopède utilise 15-20 ha pour l'élevage des jeunes : l'aspect mosaïque des habitats à cette échelle serait donc mal pris en compte par les deux variables utilisées pour caractériser le milieu. Ceci peut être aussi lié à l'imprécision des cartes d'habitats : on sait qu'un polygone d'habitat Natura 2000 comprend une mosaïque d'habitats primaire, secondaire, tertiaire, etc., mais l'information concernant la localisation de ces patchs d'habitats au sein du polygone n'est pas précisée. La donnée utilisée pour calculer les deux variables de Dim1 – axe2 décrit donc assez mal les mosaïques paysagères spatialement.

4.3.2. Des scores variables selon le type d'usages

Les gains des modèles complets par rapport aux modèles limités à l'habitat Natura 2000 montrent l'intérêt réel de la méthode développée dans l'étude, où la déclinaison fonctionnelle des habitats et l'ajout d'informations topo-climatiques apportent une plus-value intéressante, quelle que soit la « niche d'usage » étudiée.

Globalement les modèles calculés sont bons, et les moins satisfaisants sont ceux associés aux usages récréatifs. Les variables explicatives intégrées à ces modèles ne sont donc pas les seules importantes. Les usages récréatifs sont probablement contraints par une histoire, des habitudes, des aménagements à plus large échelle (commune, vallée) : les variables géophysiques ou celles associées aux ressources ressortent peu, alors que les variables d'accès restent les plus importantes pour expliquer ces usages récréatifs. Or un pixel accessible en théorie, de par une rugosité faible du terrain, peut ne pas être utilisé dans les faits car aucun chemin n'a été aménagé pour y accéder. Ceci révèle alors un biais lié à l'information disponible : c'est l'usage récréatif potentiel associé à la présence d'itinéraires qui est modélisé (modélisation d'une niche potentielle), car la divagation des randonneurs hors-sentiers est difficilement cartographiable. Concernant les usages récréatifs associés aux photographies de la base de données *Flickr*, il est possible qu'un tri dans le type de photographies prises améliore le résultat, en supposant qu'une photographie de paysage n'est pas associée aux mêmes caractéristiques fonctionnelles qu'une photographie de ses compagnons de randonnée. Cela dit, la présence d'un randonneur photographe est effective dans ce cas puisqu'il prend la photographie (modélisation d'une niche réalisée).

Les modèles présentant les meilleurs scores sont ceux qui concernent les domaines de présence des espèces non-domestiques. Il faut cependant garder à l'esprit le fait que là encore l'usage est potentiel. Par ailleurs le domaine de présence des espèces pourrait être décliné en zones d'alimentation, zones de repos, zones d'élevage des jeunes, etc. et saisonnalisés. Ce type d'information est disponible pour les galliformes, où des zones de nidification ou d'hivernage sont identifiées, et cela permet de mieux comprendre les liens entre caractéristiques fonctionnelles et usage. Cela revient à se focaliser

réellement sur l'usage plutôt que sur l'usager, de la même façon que les usages par l'Homme sont étudiés séparément avec ses différentes activités récréatives par exemple.

A première vue les hypothèses initiales concernant le lien entre usage et caractéristiques fonctionnelles sont peu validées. Néanmoins, comme pour l'exemple de la nidification du lagopède, les liens qui ressortent des modèles sont globalement cohérents avec les hypothèses. Pour les liens attendus mais non révélés par les modèles, les variables sous-jacentes à la dimension ou sous-dimension concernée pourraient être précisées. Pour la situation inverse, où des liens non-présumés ressortent, il peut être nécessaire de revenir aux variables décrivant les dimensions et sous-dimensions pour comprendre les résultats. Une même variable peut être liée à différents processus, ne correspondant pas forcément à la dimension pour laquelle la variable est utilisée en proxy. Ainsi l'aspect fleuri d'un pixel peut affecter son caractère esthétique (ressource non consommable – dimension 4), mais aussi l'aspect nutritif : la qualité fourragère diminue une fois la floraison commencée (Lavorel et al. 2011). Or, cette variable n'a pas été utilisée en proxy de la qualité des ressources consommables (dimension 5). Il serait donc intéressant de trouver des caractéristiques fonctionnelles plus spécifiques à chacune des sous-dimensions.

4.3.3. Une dépendance à la méthode utilisée

D'un point de vue méthodologique, les indicateurs de qualité des modèles varient en général dans le même sens, et une meilleure capacité prédictive est associée à une qualité de modèle plus importante. Etant donné que l'estimation de la qualité de modèle via les pseudo R^2 est impossible pour les modèles RF (pas de comparaison à un modèle nul), on peut supposer que la bonne capacité prédictive révèle la qualité des modèles RF. Même si les indicateurs de capacité prédictive TSS, Kappa et AUC sont basés sur le même principe, à savoir la comparaison entre prédictions des modèles et observations, il faut néanmoins garder à l'esprit que RF et GLM ont des hypothèses sous-jacentes différentes.

Ainsi les meilleurs scores des modèles RF par rapport aux modèles GLM peuvent être liés au fait que la méthode RF ajuste la courbe de réponse sans présumé théorique, alors que la méthode GLM est paramétrique et cherche une relation quadratique entre la variable de réponse et les variables explicatives. La contrainte appliquée ne serait donc pas toujours pertinente, et les liens entre caractéristiques fonctionnelles et usages seraient d'une autre nature, non quadratiques, plus complexes ou fortement bruités par exemple. On notera que seuls des modèles additifs ont été testés pour les GLM, sans prendre en compte d'éventuelles interactions entre variables explicatives.

Au-delà des scores des modèles, le choix d'une méthode par rapport à l'autre dépend aussi de l'objectif, comme pour les niches d'espèces. Si l'on cherche la généralité, les GLM peuvent être plus adaptés, alors que les modèles RF seront privilégiés pour les approches empiriques, où l'on cherche la précision et la réalité, en « condensant » des faits observés (Guisan, Zimmermann 2000).

4.3.4. Le cas de l'usage pastoral lié aux couchades

Cet exemple illustre bien les différences de prédiction entre les deux familles de modèles :

- les RF collent davantage aux données que les GLM, lorsque les données sont bruitées ou qu'elles s'éloignent de la théorie (les modèles RF sont non-paramétriques) : le modèle GLM prédit assez mal les zones de couchade effectives ;
- les GLM lissent les courbes de réponse : des pixels proches spatialement, qui ont donc des caractéristiques semblables, ont des probabilités de présence / absence proches, d'où des pixels d'usage potentiel groupés spatialement. Les courbes de réponse des RF peuvent au

contraire être « en dents de scie », ce qui résulte en des prédictions de présence / absence très locales, d'où les pixels d'usage potentiel éparpillés sur la zone d'étude ;

Concernant les pixels dont les caractéristiques pourraient convenir pour des couchades, mais qui ne sont pas utilisés dans les faits, différentes hypothèses peuvent être proposées :

- les pixels ne sont pas contigus (prédictions RF notamment), et il est donc peu pertinent d'y installer un troupeau de 1 000 têtes et plus, ou de séparer celui-ci. La division du troupeau engendre davantage de travail, pour l'installation des filets ou pour la conduite du troupeau vers (ou depuis) des zones de pâture ;
- la zone n°1 est trop haute en altitude et trop à l'écart par rapport aux zones de pâtures ;
- les zones n°2 et 3 sont trop proches des chemins, et bien visibles depuis le replat du refuge du Chardonnet : leur utilisation en zone de couchade pourrait donc entrer en concurrence avec les usages récréatifs. Cette hypothèse est appuyée par notre entretien avec le berger, qui avouait essayer d'éviter les zones et heures de pointe de circulation des randonneurs pour limiter les conflits. De plus la zone n°2 est toute en longueur, ce qui n'est pas optimal pour l'installation de filets ;
- pour les zones n°4 et 5, l'absence d'utilisation en couchades pourrait être liée à la présence forte de couvert forestier autour, qui peut accentuer le risque de prédation par le loup (de Roincé, Grandjean 2017 ; Gouthier et al. 2013). La couchade existante F a par ailleurs pu être préférée aux zones n°4 et 5 du fait de sa proximité à la cabane de berger ;
- les habitudes et l'historique (anciens usages, potentiellement liés au foncier) peuvent également affecter l'utilisation ou non d'une zone en couchades pour le troupeau ;

Il est par ailleurs possible que ces couchades potentielles aient peu de raisons de ne pas être utilisées : dans ce cas elles pourraient être proposées au berger, et permettre davantage de flexibilité dans la gestion du troupeau.

Cet exemple développé montre le potentiel de la méthode, mais il serait intéressant de confronter les modèles et leurs prédictions à d'autres unités d'étude dont les usages sont connus. Les hypothèses proposées ci-dessus pourraient être soumises au berger et confrontées à ses explications à lui. Elles peuvent aussi permettre d'enrichir la caractérisation fonctionnelle des pixels en y ajoutant davantage d'informations, notamment sur l'historique d'usage et le contexte spatial du pixel. Par exemple, une variable explicative « densité forestière dans une zone tampon autour du pixel » pourrait améliorer les modèles (*cf* cas des zones n°4 et 5), ou encore une variable « nombre de pixels depuis lesquels le pixel étudié est visible » (*cf* cas des zones n°2 et 3). Ces informations sont partiellement incluses dans Dim1 – axe1, associée aux cônes de visibilité, ce qui peut expliquer le fait que cette variable ait un score d'importance de 88/100 pour le modèle GLM (Annexe 10). L'utilisation de modèles prenant mieux en compte l'interdépendance spatiale des pixels pourrait également améliorer les prédictions, au vu de l'importance de la contiguïté de pixels aux caractéristiques favorables à un usage pour avoir un usage effectif. Ceci est fortement lié à l'étude d'usagers plus ou moins mobiles, avec des usages qui nécessitent une surface supérieure à celle d'un unique pixel.

5. Analyse réseau et rapport entre usages

Après avoir caractérisé les « niches d'usage », c'est-à-dire le lien entre chaque usage et les caractéristiques fonctionnelles du milieu, l'objectif est de considérer tous les usages en même temps. La question traitée dans cette partie est donc (3) quelles relations entre activités / usages (évitements ou co-utilisations), se retrouvent sur l'unité pastorale étudiée, en hiver et en été ?

5.1. Méthode mise en place

5.1.1. Lien usage-pixel et réseaux bipartis

Chaque usage est spatialisé, on dispose donc d'un ensemble d'usages d'une part, et d'un ensemble de pixels d'autre part, avec des liens entre ces deux ensembles mais pas au sein de chaque ensemble. En effet, dans un premier temps les usages sont considérés comme indépendants : les potentiels liens entre usages sont supposés indirects, via une ressource par exemple. Les liens entre pixels sont quant à eux partiellement intégrés, via la caractérisation fonctionnelle présentée dans la partie 2.2.6.3. Ce système divisé en deux ensembles présente donc une structure bipartite, et ce sont donc des réseaux bipartis qui sont utilisés.

Les réseaux bipartis sont utilisés dans de nombreux domaines : par exemple en écologie pour des systèmes ressources-utilisateurs, comme avec les réseaux plantes-pollinisateurs, et dans le domaine des socio-écosystèmes pour l'évaluation des services écosystémiques ou la gestion de ressources (Bodin et al. 2006 ; Dee et al. 2017 ; Janssen et al. 2006). Ces thématiques font écho à l'étude présentée ici. Dans un autre contexte, Denelle et al., 2020 utilisent les réseaux bipartis pour une étude spatialisée sites/espèces végétales : c'est ce principe qui est utilisé ici, avec des réseaux bipartis pixels/usages.

Pour caractériser les interrelations spatiales des usages via l'outil réseau, les métriques calculables concernent soit le réseau dans son ensemble (connectance, modularité, densité de liens...), soit les nœuds. Ainsi l'intensité d'usage de chacun des pixels est calculée via le degré des nœuds du réseau biparti, i.e. leur nombre de liens. Le calcul est réalisé en considérant tous les usages, seulement les usages humains, ou seulement les usages animaux. Le degré normalisé est également calculé : il renseigne sur la proportion d'usages effectifs relativement au nombre d'usages potentiels (pour une saison et un type d'usage (tous, humains ou animaux) donnés). Afin d'obtenir une information plus fonctionnelle, le degré des pixels est superposé à l'ACP réalisée au paragraphe 3.2.2.

5.1.2. Lien entre usages et réseaux pondérés

Dans un second temps, un réseau uniparti des usages est calculé. Ce réseau relie les usages entre eux, par des liens dont le poids est fonction du nombre de couples pixel-saison que les deux usages se partagent. A partir de ce réseau, en s'inspirant de l'article de Denelle et al., 2020, le caractère « généraliste » ou « spécialiste » de chaque usage est calculé, selon l'équation (4).

$$\tau_i = 1 - \sum_{j=1}^N \left(\frac{k_{ij}}{k_i} \right)^2 \quad (4)$$

avec : τ_i « l'indice de spécialisation » de l'usage i

k_{ij} le nombre de liens entre les usages i et j dans le réseau (i.e. le nombre de couples pixel-saison qui partagent les usages i et j)

k_i le nombre total de liens de l'usage i dans le réseau (ce nombre peut être supérieur au nombre de couples pixel-saison, car plusieurs liens peuvent correspondre au même couple pixel-saison, mais à des couples d'usages différents)

N le nombre d'usages dans le réseau

Cet indice de spécialisation varie de 0 à $1 - \frac{1}{N}$, avec 0 les usages strictement spécialistes, c'est-à-dire qui ne se trouvent que sur des couples pixel-saison où il n'y a pas d'autre usage, et $1 - \frac{1}{N}$ les usages généralistes, qui se trouvent uniquement sur des couples pixel-saison où tous les autres usages sont également présents. Ainsi plus un usage est spécialiste, moins il n'entrera en conflit avec les autres usages, et inversement.

5.2. Résultats

5.2.1. Densité d'usages sur l'unité pastorale

Spatialisation des zones multifonctionnelles et des zones peu utilisées

La cartographie du degré des couples pixel-saison reflète la saisonnalité des usages et de l'occupation de l'espace. Les zones de plus haute altitude en bordure de l'unité pastorale (ouest et sud-ouest) sont moins utilisées en hiver (quatre à cinq usages contre cinq à sept en été), et les usages semblent plus diffus, notamment pour les usages humains associés à la pratique du ski de randonnée (Figure 11 et Annexe 12).

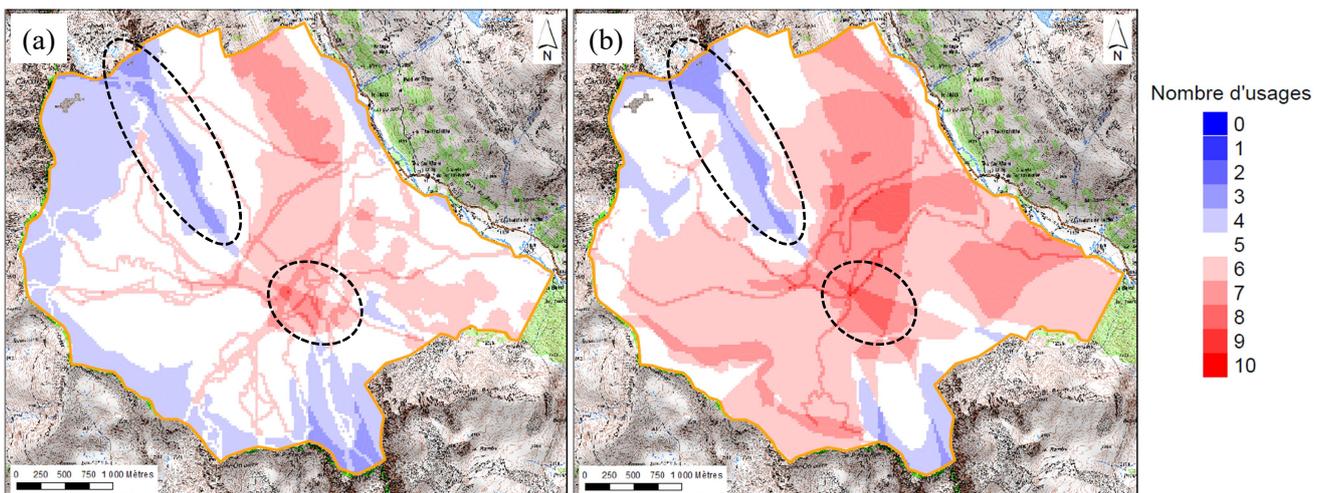


Figure 11 : Degré des pixels en hiver (a) et en été (b) dans le réseau biparti pixels – usages. Les ellipses signalent une zone relativement peu utilisée (crête du Queyrellin au nord-ouest) et une zone fortement utilisée (replat au sud du refuge du Chardonnet) pendant les deux saisons étudiées.

La crête du Queyrellin reste peu utilisée en hiver et en été, avec quatre voire trois usages dans sa partie médiane (chamois, bouquetin, lagopède), contrairement au replat à proximité du refuge, qui concentre de nombreux usages (Figure 11 et Annexe 0 : Atlas cartographique et photographique).

Lien entre multifonctionnalité et caractéristiques des milieux

La superposition du degré normalisé des pixels et de leurs caractéristiques fonctionnelles est présentée sur l'ACP de la Figure 12.

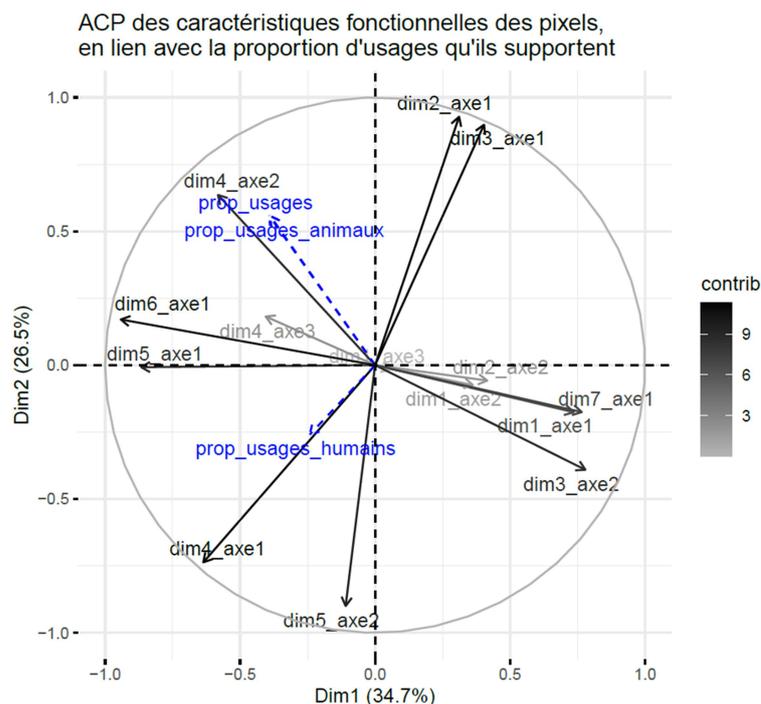


Figure 12 : Lien entre les caractéristiques fonctionnelles des couples pixel-saison et le nombre d'usages qu'ils supportent (relativement au nombre d'usages potentiels pris en compte dans l'étude). Les variables en bleu sont intégrées en tant que variables supplémentaires dans l'ACP, et correspondent au degré normalisé des couples pixel-saison dans le réseau pixel-saison – usages. La couleur des autres variables correspond à leur contribution au plan 1:2.

Le degré normalisé des nœuds pour le réseau pixel-saison – usages animaux (variable *prop_usages_animaux*) n'est pas corrélé aux mêmes caractéristiques fonctionnelles que celui du réseau pixel-saison – usages humains (variable *prop_usages_humains*). En effet, le premier est corrélé à la densité verticale de la végétation et à la quantité de biomasse (Dim4 – axe2 et Dim6 – axe1), et corrélé négativement à l'indisponibilité en sol, à la naturalité et à la qualité scénique (Dim3 – axe2, Dim7 – axe1 et Dim1 – axe1 respectivement) ; le second est relativement indépendant des variables fonctionnelles utilisées dans l'analyse (flèche courte dans le plan 1:2, mais aussi dans les autres plans – données non présentées), même s'il semble que la saisonnalité joue beaucoup sur le nombre d'usages humains (ex. le pastoralisme ne concerne que la saison estivale).

Couchades et multifonctionnalité

Comme dans le paragraphe 4.2.3. , nous nous intéressons à l'usage pastoral et plus précisément aux zones de couchade du troupeau ovin. Le degré moyen est comparé pour différentes catégories de nœuds (Figure 13), selon leur localisation relativement à l'usage « couchade ».

Bien que les différences ne soient pas significatives, des tendances se dégagent : les zones de couchade sont situées au niveau de pixels plus utilisés que la moyenne (degré moyen de 5.84 dans le réseau comprenant les couchades, contre 7.52 en moyenne pour les pixels en zone de couchade). Les pixels propices à l'installation de couchades mais non utilisés dans les faits (résultats des modèles RF et GLM présentés au paragraphe 4.2.3.) ont un degré moyen plus élevé de 5 % par rapport aux pixels utilisés effectivement en couchade, et de 18 % par rapport aux pixels hors couchades.

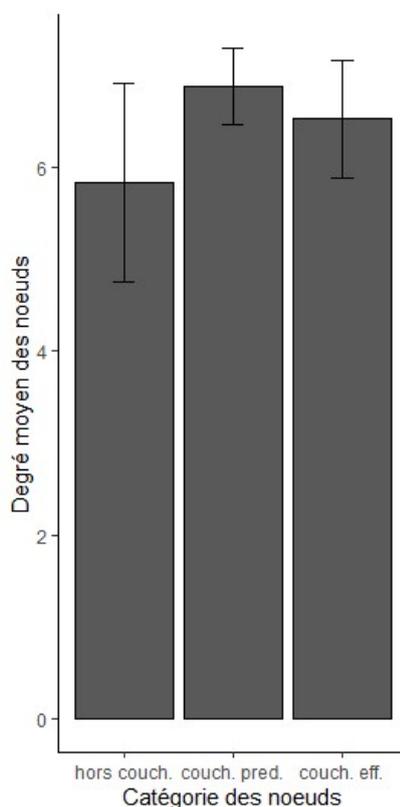


Figure 13 : Degré moyen de différentes catégories de nœuds, dans le réseau biparti pixel-été - usages (hors usage "couchade"). Les zones de couchade prédites correspondent aux zones où les modèles RF et GLM concordent, soit pour 70 pixels (voir paragraphe 4.2.3. . hors couch. : hors zone de couchade, degré moyen 5.83 ; couch. pred. : en zone de couchade prédite mais non effective, degré moyen 6.87 ; couch. eff. : en zone de couchade effective, degré moyen 6.52

5.2.2. Relations entre usages

Le réseau d'usages est construit à partir des pixels qu'ils partagent. Ce réseau permet de calculer un indice de spécialisation pour chaque usage, présenté dans la Figure 14. Plus l'indice est proche de 0, plus l'usage est spécialiste, et plus il s'approche de $1 - \frac{1}{N} = 0.933$ (avec $N = 15$ usages), plus l'usage est généraliste. Dans le cas du réseau étudié ici, l'indice minimal vaut 0.908 : les usages sont globalement peu spécialistes. En comparant les usages entre eux, il est néanmoins possible d'ordonner

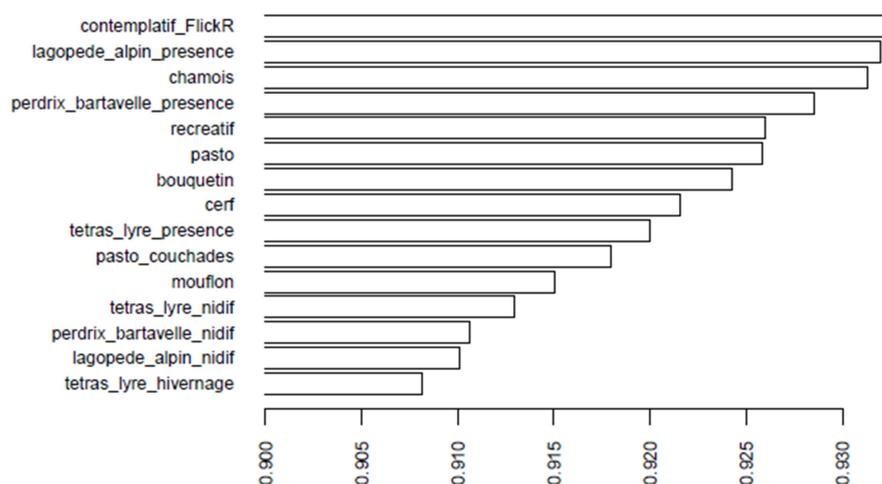


Figure 14 : Indice de spécialisation des usages considérés dans l'étude (un indice plus faible indique un niveau de spécialisation plus important).

les usages en fonction de leur spécialisation relative. Il apparaît alors que les zones de nidification et d'hivernage des galliformes sont les usages les plus spécialistes, alors que les pixels où sont prises des photographies (usage nommé *contemplatif_Flickr*) révèlent un usage généraliste (Figure 14).

5.3. Discussion

5.3.1. Le multi-usage sur l'unité pastorale : entre caractère favorable des conditions et exclusion de niche

Un gradient altitudinal semble se dégager lorsque l'on considère la multifonctionnalité des pixels, via les cartes de nombre d'usages. D'un point de vue plus fonctionnel, le nombre d'usages décroît avec la rudesse des conditions : indisponibilité en sol (Dim3 – axe2), quantité moindre de biomasse (Dim6 – axe1), zones où la vue est importante mais qui sont donc des zones exposées (Dim1 – axe1). Ces caractéristiques sont indépendantes de la saison (mis à part Dim6 – axe1, qui l'est partiellement), d'où les tendances similaires en hiver et en été.

On pourrait supposer que les animaux non domestiques utilisent des zones où la naturalité est plus importante, mais il semble que ce soit parfois le contraire, avec un nombre d'usages animaux corrélé négativement à la sous-dimension « naturalité » (Dim7 – axe1) : les infrastructures humaines sont bâties dans des zones hautement multifonctionnelles et utilisées par les animaux. Il faut cependant garder à l'esprit le fait que les usages animaux considérés dans l'analyse sont des usages potentiels. Il se peut que dans les faits les animaux évitent les zones situées dans un rayon donné autour des infrastructures : des données plus précises sur les usages animaux effectifs seraient donc pertinentes. Il se peut aussi que l'évitement se fasse à l'échelle d'une journée, pendant laquelle les animaux utilisent les espaces communs le soir / la nuit / tôt le matin (ONCFS, <http://www.oncfs.gouv.fr/> ; le cas du chamois est documenté dans Duparc, 2016). Par ailleurs, le nombre d'usages animaux est une variable qui considère ensemble différentes espèces animales dont les comportements peuvent être très différents. On notera par exemple que dans les modèles présentés au paragraphe 4.2.2. , la probabilité de présence du mouflon croît avec la naturalité, alors que celle du cerf décroît (Tableau 16).

Concernant l'usage pastoral, les résultats d'analyse du réseau d'usage appuient encore l'hypothèse d'évitement, en caractérisant les zones pourtant propices à l'installation de couchades mais non utilisées. Pour la tranquillité du troupeau et des autres usagers, le berger peut en effet choisir des zones où la densité d'usage est moins importante, ce qui se traduit par des différences de degrés moyens tels que présentés dans la Figure 13. On peut aussi supposer que le lien de cause à effet est inversé : ce sont les autres usagers qui évitent les zones de couchades. Il est impossible de valider une de ces deux hypothèses étant donné que nous étudions ici des réseaux non orientés, qui révèlent des interrelations et non pas des liens causaux. Là encore, comme pour les modèles du paragraphe 4. , l'historique pourrait être intéressant et renseigner sur l'ordre d'apparition des usages. Une présentation et discussion des résultats avec le berger permettrait également de clarifier les mécanismes qui entrent en jeu.

Ainsi la présence ou non d'un usage ne peut être expliquée seulement par des caractéristiques fonctionnelles du milieu (conditions topo-climatiques, présence de ressources consommables et non consommables, accessibilité...), la prise en compte des autres usages est également nécessaire. Ceci fait écho à l'écologie des communautés, où la présence ou l'absence d'une espèce est régie par les caractéristiques du milieu mais aussi par ses relations avec les autres espèces : compétition, prédation, mutualisme, etc.

5.3.2. La spécialisation ou non au sein d'un réseau : une approche intéressante pour les conflits d'usage

Le fait que les valeurs d'indice de spécialisation soient assez éloignées de 0 est lié à la forte utilisation de l'espace sur l'unité pastorale du Chardonnet, entraînant une densité du réseau importante. La comparaison des valeurs relatives reste pertinente. Ainsi les zones de nidification et d'hivernage des galliformes sont les usages les plus spécialistes parmi les usages considérés. Ce sont des usages très sensibles au dérangement, à cause de la présence de jeunes plus vulnérables, et à cause de l'importance des pertes énergétiques si un tétras hivernant est dérangé : les galliformes sont moins mobiles durant ces périodes, et peuvent moins fuir le dérangement. Il est donc cohérent que ce soit les usages les plus spécialistes.

Au contraire la prise de photographie semble être l'usage le plus généraliste parmi les usages considérés. D'une part ce caractère non spécialiste fait écho aux difficultés de modélisation de l'usage : il semble que les caractéristiques fonctionnelles des milieux ne sont pas suffisantes pour expliquer la spatialisation de cet usage (voir paragraphe 4.2.2.). D'autre part, cela signifie que l'usage se rencontre là où de nombreux autres usages sont également présents, il serait donc associé à davantage de conflits potentiels : dérangement de la faune sauvage, et dérangement du troupeau, qui peut être gardé par un patou pouvant se montrer agressif envers les photographes qui s'approcheraient trop des brebis. Sur ce point il est intéressant de remarquer que la prise d'une photographie est un usage ponctuel dans le temps et dans l'espace, alors que des zones de présence d'espèces et des quartiers de pâturage sont sur des échelles spatio-temporelles plus larges. En considérant l'échelle saisonnière, on présuppose qu'un usage, même court, peut avoir des effets dans la durée ; cette échelle permet en outre de composer avec de grandes aires de présence, pour la faune sauvage. Une échelle temporelle plus fine permettrait de préciser la durée d'utilisation, et donc les temps de contact entre deux usages, mais nécessiterait également des informations spatio-temporelles plus précises.

5.3.3. Les limites de l'approche réseau pour cette étude

L'approche réseau fournit un angle de vue intéressant pour l'étude des systèmes, avec des métriques topologiques communes quelle que soit la discipline. Cependant ces métriques ne sont pas toutes adaptées pour le cas de l'unité pastorale du Chardonnet, où le réseau biparti est très dense, ce qui limite son analyse à quelques mesures générales. Dans notre étude, un certain nombre d'usages ont été pris en compte, mais de manière hétérogène. Plusieurs d'entre eux sont des usages potentiels et peu précis (cas des domaines vitaux par exemple). Comme pour la modélisation spatiale des usages et la recherche de lien fonctionnel avec les milieux, la description des usages effectifs et plus précis (herbivorie, zone de reproduction, hivernage, ...) pour les animaux sauvages et activités humaines considérés, rendraient sûrement l'approche réseau plus pertinente.

6. Conclusion, bilan et perspectives de l'étude

Des milieux et usages bien caractérisés sur le site du Chardonnet

Les différents milieux de cette zone de montagne se distinguent dans un premier temps par un gradient grossièrement altitudinal, qui masque en fait différentes composantes fonctionnelles : celle liée aux ressources consommables (présence de ressources consommables alimentaires plus faible en altitude, en quantité et en qualité), un effet lié aux caractéristiques géophysiques (disponibilité en sol moins importante à haute altitude), un effet lié aux infrastructures humaines (distance à ces infrastructures plus grande à haute altitude), et un effet lié au contexte visuel (cône de visibilité plus grand sur le haut du gradient altitudinal). La fourniture de ressources non consommables (abri topographique et minéral) distingue les milieux dans un second temps.

La localisation spatiale des usages en place est plus ou moins liée à ces caractéristiques fonctionnelles des milieux, même si d'autres facteurs doivent être pris en compte pour comprendre la distribution spatiale de certains usages. Pour les usages humains, qui peuvent dépendre fortement d'un contexte socio-économique et d'un historique, ceci n'est pas étonnant (on notera que ces deux éléments pourraient aussi affecter les usages animaux *a priori*). Un autre des facteurs explicatifs serait l'équivalent des mécanismes d'exclusion de niche rencontrés en écologie des communautés : la présence ou non d'un usage, humain ou animal, dépend des caractéristiques fonctionnelles du milieu mais aussi des interactions avec les autres usages en place.

Une méthode intéressante et innovante...

La méthode développée dans cette étude pour caractériser les milieux et leurs liens avec les usages paraît intéressante sur différents plans : son caractère souple et transposable, avec un cadre conceptuel clair, permettrait de l'appliquer dans d'autres situations, pour d'autres zones d'étude. Sa vision fonctionnelle va au-delà de la « simple » cartographie utilisée dans le domaine de la gestion des milieux naturels.

La considération simultanée des animaux et des humains en tant qu'usagers dépasse les visions anthropo- ou naturo-centrées. Par ailleurs, cette méthode se trouve au carrefour entre plusieurs disciplines (écologie végétale, écologie des communautés, mathématiques et topologie...) : outils, méthodes, principes et théories se transposent de l'une à l'autre, avec des équivalences comme niche d'espèce / niche d'usage, principe d'exclusion de niche / évitements entre usages. Cette transdisciplinarité révèle ainsi de nombreux points communs dans le fonctionnement de tous les systèmes, qu'ils soient écologiques, sociaux ou mixtes.

... transposable dans le temps et dans l'espace...

La mise en place d'un cadre conceptuel permet d'ordonner fonctionnellement les informations décrivant l'unité d'étude. Le cadre reste large et souple, ce qui permet d'y intégrer d'autres informations que celles utilisées ici, selon leur disponibilité ou les questions posées.

Par ailleurs ce cadre n'est pas figé dans le temps : nous l'avons ici mis en place pour deux saisons, mais il serait applicable à d'autres échelles temporelles (journalière, annuelle, décennale). Il suffit de choisir les variables pertinentes. Cela vient aussi de l'approche par pixels plutôt que par polygones : alors que les limites d'un polygone peuvent bouger dans le temps selon l'évolution de ses caractéristiques fonctionnelles, ce n'est pas le cas pour celles d'un pixel. Il serait donc plus facile d'étudier l'évolution d'un milieu et des usages qu'il supporte avec le cadre et la méthode présentés ici, par exemple pour voir si caractéristiques fonctionnelles et usages changent au même rythme et si les liens sont conservés.

A cette souplesse s'ajoute le fait que les données sources sont issues de bases couvrant de nombreuses régions du monde (MNT, données d'habitat pouvant être dérivées d'images satellites, etc.). La méthode de caractérisation fonctionnelle des milieux serait donc transposable ailleurs. En comprenant mieux la présence ou non d'usages sur d'autres zones d'étude, il serait intéressant de voir si un même usage est toujours lié aux mêmes caractéristiques fonctionnelles du milieu.

... qui pourrait être utilisée dans le domaine de la gestion des milieux naturels...

En allant au-delà de la « simple » cartographie des zones de conflit d'usages, la compréhension fonctionnelle de la présence de plusieurs usages peut fournir des pistes de gestion des milieux. Par exemple, si une zone de couchade entre en conflit avec une zone de nidification de galliforme, il est possible de proposer des zones alternatives aux caractéristiques fonctionnelles proches qui conviendront aussi bien à la mise en place de couchade, sans interférer avec la nidification.

... mais qui présente néanmoins quelques limites sur lesquelles travailler

La principale limite de la méthode est la disponibilité des données.

Ici nous avons utilisé les données Natura 2000 pour dériver les caractéristiques fonctionnelles liées à la végétation (voir paragraphes 2.2.6. et 2.3.) ; il est aussi envisageable d'utiliser l'imagerie satellite, et/ou de faire des mesures de terrain pour obtenir ces informations. Dans le premier cas, la base de données OSO issue du traitement d'images Sentinel-2 (OSO 2018, <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/~oso/>), est mise à jour et améliorée tous les ans : c'est une source d'information intéressante une fois que le lien entre catégories de végétation (landes, pelouses, surfaces minérales, ...) et caractéristiques fonctionnelles (hauteur de végétation, taux de couvert du sol, ...) est déterminé. Ce lien peut être précisé via des modèles calibrés à partir de mesures de terrain.

Pour les données d'usages animaux, des cartographies basées sur les relevés de crottiers, comme pour le tétras-lyre, seraient envisageables : elles permettraient de passer d'usages potentiels (domaines de présence larges) à des usages effectifs. Ce serait néanmoins très coûteux en temps pour cartographier une large zone d'étude, et ne renseignerait pas forcément l'ensemble du domaine d'utilisation (les crottiers peuvent n'être localisés qu'en des points aux caractéristiques particulières). L'utilisation de pièges photographiques est une autre approche, limitée cette fois-ci par le nombre de pièges à disposer pour couvrir une large zone. L'équipement GPS de certains individus pourrait aussi permettre d'améliorer les cartographies de domaine de présence utilisées ici.

Références bibliographiques

ALLISON, Paul, 2013. What's the Best R-Squared for Logistic Regression? In : [en ligne]. 13 février 2013. [Consulté le 15 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://statisticalhorizons.com/r2logistic>.

ALLOUCHE, Omri, TSOAR, Asaf et KADMON, Ronen, 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS): Assessing the accuracy of distribution models. In : *Journal of Applied Ecology*. 12 septembre 2006. Vol. 43, n° 6, pp. 1223-1232. DOI 10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x.

ANDERIES, John M., JANSSEN, Marco A. et OSTROM, Elinor, 2004. A Framework to Analyze the Robustness of Social-ecological Systems from an Institutional Perspective. In : *Ecology and Society*. 2004. Vol. 9, n° 1, pp. art18. DOI 10.5751/ES-00610-090118.

BELLEAU, Eric, BERNARD-LAURENT, Ariane, BOUVET, Pierre, FAIVRE, Thierry, SERRES, Jean-Pierre et TANGIS, Sophie, 2018. *La Perdrix bartavelle dans les Alpes : résultats d'une étude en Dévoluy* [en ligne]. octobre 2018. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : <http://www.oncfs.gouv.fr/IMG/pdf/ONCFS-Carnet-Perdrix-bartavelle-Web-1.pdf>.

BENISTON, Martin, 2003. Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. In : *Climatic Change*. 2003. Vol. 59, n° 1/2, pp. 5-31. DOI 10.1023/A:1024458411589.

BENSETTITI, F., BOULLET, V., CHAUAUDRET-LABORIE, C. et DENIAUD, J., 2005. *Cahier d'habitats Natura 2000 - Habitats agropastoraux (Tome 4-2)* [en ligne]. S.l. MATE / MAP / MNHN. Disponible à l'adresse : <http://www.natura2000.fr/documentation/references-bibliographiques/cahier-habitats-natura-2000-habitats-agropastoraux-0>.

BENSETTITI, F., GAUDILLAT, V. et HAURY, J., 2002. *Cahier d'habitats Natura 2000 - Habitats humides (Tome 3)* [en ligne]. S.l. MATE / MAP / MNHN. Disponible à l'adresse : <http://www.natura2000.fr/documentation/references-bibliographiques/cahier-habitats-natura-2000-habitats-humides>.

BENSETTITI, F., RAMEAU, J.C. et CHEVALLIER, H., 2001. *Cahier d'habitats Natura 2000 - Habitats forestiers (Tome 1)* [en ligne]. S.l. MATE / MAP / MNHN. Disponible à l'adresse : <http://www.natura2000.fr/documentation/references-bibliographiques/cahier-habitats-natura-2000-habitats-forestiers>.

BIVAND, Roger, KRUG, Rainer, NETELER, Markus et JEWORUTZKI, Sebastian, 2019. *rgrass7: Interface Between GRASS 7 Geographical Information System and R* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 20 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=rgrass7>.

BODIN, Örjan, CRONA, Beatrice et ERNSTSON, Henrik, 2006. Social Networks in Natural Resource Management : What Is There to Learn from a Structural Perspective? In : *Ecology and Society* [en ligne]. 2006. Vol. 11, n° 2. [Consulté le 3 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/resp2/>.

BORNARD, André, BASSIGNANA, Mauro, BERNARD-BRUNET, Claude, LABONNE, Sophie et COZIC, Philippe, 2007. *Les végétations d'alpage de la Vanoise: description agro-écologique et gestion pastorale*. Versailles : Quae. ISBN 978-2-7592-0016-0.

BOULANGEAT, Isabelle, PHILIPPE, Pauline, ABDULHAK, Sylvain, DOUZET, Roland, GARRAUD, Luc, LAVERGNE, Sébastien, LAVOREL, Sandra, VAN ES, Jérémie, VITTOZ, Pascal et THUILLER, Wilfried, 2012. Improving plant functional groups for dynamic models of biodiversity: at the crossroads between functional and community ecology. In : *Global Change Biology*. novembre 2012. Vol. 18, n° 11, pp. 3464-3475. DOI 10.1111/j.1365-2486.2012.02783.x.

- BURKHARD, Benjamin, KROLL, Franziska, MÜLLER, Felix et WINDHORST, Wilhelm, 2009. Landscapes' capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. In : *Landscape Online*. 1 décembre 2009. Vol. 15, pp. 1-22. DOI 10.3097/LO.200915.
- BURKHARD, Benjamin, KROLL, Franziska, NEDKOV, Stoyan et MÜLLER, Felix, 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. In : *Ecological Indicators*. octobre 2012. Vol. 21, pp. 17-29. DOI 10.1016/j.ecolind.2011.06.019.
- BYCZEK, Coline, LONGARETTI, Pierre-Yves, RENAUD, Julien et LAVOREL, Sandra, 2018. Benefits of crowd-sourced GPS information for modelling the recreation ecosystem service. In : LI, Lixiang (éd.), *PLOS ONE*. 15 octobre 2018. Vol. 13, n° 10, pp. e0202645. DOI 10.1371/journal.pone.0202645.
- CAMPTOCAMP ASSOCIATION, [sans date]. Camptocamp. In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.camptocamp.org>.
- CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES METEOROLOGIQUES, [sans date]. Le modèle Crocus. In : [en ligne]. [Consulté le 7 avril 2020 a]. Disponible à l'adresse : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article265>.
- CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES METEOROLOGIQUES, [sans date]. Le modèle ISBA : Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère. In : [en ligne]. [Consulté le 7 avril 2020 b]. Disponible à l'adresse : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article146>.
- CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES METEOROLOGIQUES, [sans date]. Le modèle SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie. In : [en ligne]. [Consulté le 7 avril 2020 c]. Disponible à l'adresse : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article788>.
- CESBIO, [sans date]. OSO. In : [en ligne]. [Consulté le 5 mars 2020]. Disponible à l'adresse : <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/~oso/>.
- CGIAR-CSI, [sans date]. SRTM - DEM information. In : [en ligne]. [Consulté le 13 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>.
- CHAIX, Christophe, DODIER, Hermann et NETTIER, Baptiste, 2017. *Comprendre le changement climatique en alpage - Une production du réseau Alpes Sentinelles* [en ligne]. 2017. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : https://www.mountainwilderness.fr/IMG/pdf/changementclimatiqueenalpage_irstea.pdf.
- CONSERVATOIRE RHÔNE-ALPES DES ESPACES NATURELS, FAVEROT, Pascal, LAUER, Estelle et MAGNANI, Yann, 2010. *Entre forêts et pelouses: habitat de reproduction du tétras-lyre : habitats, espèces, gestion, sites*. Vourles : Conservatoire Rhône-Alpes des espaces naturels. ISBN 978-2-908010-72-5.
- DE ROINCÉ, Catherine et GRANDJEAN, Alexis, 2017. Évaluation de l'efficacité de la protection des troupeaux contre le loup (2009-2014). In : *Centre d'études et de prospective*. mars 2017. n° 99, pp. 4.
- DEE, Laura E., ALLESINA, Stefano, BONN, Aletta, EKLÖF, Anna, GAINES, Steven D., HINES, Jes, JACOB, Ute, MCDONALD-MADDEN, Eve, POSSINGHAM, Hugh, SCHRÖTER, Matthias et THOMPSON, Ross M., 2017. Operationalizing Network Theory for Ecosystem Service Assessments. In : *Trends in Ecology & Evolution*. février 2017. Vol. 32, n° 2, pp. 118-130. DOI 10.1016/j.tree.2016.10.011.
- DENELLE, Pierre, VIOLLE, Cyrille, DIVGRASS CONSORTIUM et MUNOZ, François, 2020. Generalist plants are more competitive and more functionally similar to each other than specialist

plants: insights from network analyses. In : *Journal of Biogeography*. 25 avril 2020. pp. jbi.13848. DOI 10.1111/jbi.13848.

DRAY, Stéphane, DUFOUR, Anne-Béatrice, THIOULOUSE, and Jean, JOMBART, with contributions from Thibaut, PAVOINE, Sandrine, LOBRY, Jean R., OLLIER, Sébastien, BORCARD, Daniel, LEGENDRE, Pierre et CHESSEL, Stéphanie Bougeard and Aurélie Siberchicot Based on earlier work by Daniel, 2018. *ade4: Analysis of Ecological Data: Exploratory and Euclidean Methods in Environmental Sciences* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 15 octobre 2019]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=ade4>.

DUPARC, Antoine, 2016. *Dynamiques spatio-temporelles des ressources alimentaires et des activités humaines : impacts sur la sélection d'habitat d'un grand herbivore de montagne* [en ligne]. S.l. : Université Grenoble Alpes. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01529843>.

ETTEN, Jacob van et SOUSA, Kaue de, 2020. *gdistance: Distances and Routes on Geographical Grids* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 27 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=gdistance>.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2015. User guides - Sentinel-2 MSI - Spatial resolution. In : [en ligne]. juillet 2015. Disponible à l'adresse : <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>.

FÉDÉRATION DÉPARTEMENTALE DES CHASSEURS DE L'ISÈRE et ONCFS, 2014. *Plan d'action pour la conservation du tétras-lyre et de ses habitats en Rhône-Alpes - Diagnostic des habitats d'hivernage : notice opérationnelle*. janvier 2014. S.l. : s.n.

GARNIER, E., LAVOREL, S., ANSQUER, P., CASTRO, H., CRUZ, P., DOLEZAL, J., ERIKSSON, O., FORTUNEL, C., FREITAS, H., GOLODETS, C., GRIGULIS, K., JOUANY, C., KAZAKOU, E., KIGEL, J., KLEYER, M., LEHSTEN, V., LEPS, J., MEIER, T., PAKEMAN, R., PAPANASTASIOU, M., PAPANASTASIS, V. P., QUESTED, H., QUETIER, F., ROBSON, M., ROUMET, C., RUSCH, G., SKARPE, C., STERNBERG, M., THEAU, J.-P., THEBAULT, A., VILE, D. et ZAROVALI, M. P., 2007. Assessing the Effects of Land-use Change on Plant Traits, Communities and Ecosystem Functioning in Grasslands: A Standardized Methodology and Lessons from an Application to 11 European Sites. In : *Annals of Botany*. 1 mai 2007. Vol. 99, n° 5, pp. 967-985. DOI 10.1093/aob/mcl215.

GÉOPÊCHE et NISON, Laurent, [sans date]. Carte interactive de localisation des zones de pêche. In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://map.geopeche.com/05/#13;6.542528;45.024497>.

GITAY, H et NOBLE, I.R., 1997. What are functional types and how should we seek them? In : *Vegetational Functional Types: Their relevance to eco- system properties and global change*. Cambridge : Cambridge University Press. pp. 3-19.

GOUTHIER, Axelle, GENEVET, Emmanuelle et CHAMBRES D'AGRICULTRIE LANGUEDOC ROUSSILLON, 2013. *Analyse de vulnérabilité des élevages gardois à la prédation en vue de la réduire avec des moyens adaptés - Rapport de stage de 2ème année SupAgro Montpellier* [en ligne]. novembre 2013. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : http://www.gard.gouv.fr/content/download/9708/58208/file/DOC_201311_analyse_vulnerabilite.pdf.

GRIGULIS, Karl, LAVOREL, Sandra, KRÄINER, Ute, LEGAY, Nicolas, BAXENDALE, Catherine, DUMONT, Maxime, KASTL, Eva, ARNOLDI, Cindy, BARDGETT, Richard D., POLY, Franck, POMMIER, Thomas, SCHLOTTER, Michael, TAPPEINER, Ulrike, BAHN, Michael et CLÉMENT, Jean-Christophe, 2013. Relative contributions of plant traits and soil microbial properties to mountain grassland ecosystem services. In : HUTCHINGS, Michael (éd.), *Journal of Ecology*. janvier 2013. Vol. 101, n° 1, pp. 47-57. DOI 10.1111/1365-2745.12014.

GRIME, J. P., 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. In : *Journal of Ecology*. décembre 1998. Vol. 86, n° 6, pp. 902-910. DOI 10.1046/j.1365-2745.1998.00306.x.

GUIBAN, Antoine et ZIMMERMANN, Niklaus E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. In : *Ecological Modelling*. décembre 2000. Vol. 135, n° 2-3, pp. 147-186. DOI 10.1016/S0304-3800(00)00354-9.

HASTIE, Trevor, 2019. *gam: Generalized Additive Models* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 20 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=gam>.

HIJMANS, Robert J., ETTEN, Jacob van, SUMNER, Michael, CHENG, Joe, BEVAN, Andrew, BIVAND, Roger, Busetto, Lorenzo, CANTY, Mort, FORREST, David, GHOSH, Aniruddha, GOLICHER, Duncan, GRAY, Josh, GREENBERG, Jonathan A., HIEMSTRA, Paul, HINGEE, Kassel, GEOSCIENCES, Institute for Mathematics Applied, KARNEY, Charles, MATTIUZZI, Matteo, MOSHER, Steven, NOWOSAD, Jakub, PEBESMA, Edzer, LAMIGUEIRO, Oscar Perpignan, RACINE, Etienne B., ROWLINGSON, Barry, SHORTRIDGE, Ashton, VENABLES, Bill et WUEEST, Rafael, 2020. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 20 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.

HUSSON, Francois, JOSSE, Julie, LE, Sebastien et MAZET, Jeremy, 2019. *FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 14 octobre 2019]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR>.

HUTCHINSON, G. E., 1957. Concluding Remarks. In : *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 1 janvier 1957. Vol. 22, n° 0, pp. 415-427. DOI 10.1101/SQB.1957.022.01.039.

IGN, 2013. *RGE ALTI® Version 2.0 - Descriptif de contenu*. février 2013. S.l. : s.n.

IGN, 2014. *BD Forêt® Version 2 - Descriptif du contenu*. septembre 2014. S.l. : s.n.

IGN, 2019. *BD TOPO® Version 3.0 - Descriptif de contenu*. In : . 2019. pp. 363.

INPN-MNHN, [sans date]. INPN - FSD Natura 2000 - FR9301499 - Clarée - Description. In : [en ligne]. [Consulté le 18 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR9301499>.

INRAE, [sans date]. Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche (CLPA). In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.avalanches.fr/clpa-presentation/>.

IPBES, 2019. *IPBES Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services - Chapter 2.3. Status and Trends - Nature's Contributions to People (NCP)* [en ligne]. 2019. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : https://ipbes.net/sites/default/files/ipbes_global_assessment_chapter_2_3_ncp_unedited_31may.pdf.

JANSSEN, Marco A., BODIN, Örjan, ANDERIES, John M., ELMQVIST, Thomas, ERNSTSON, Henrik, MCALLISTER, Ryan R. J., OLSSON, Per et RYAN, Paul, 2006. Toward a Network Perspective of the Study of Resilience in Social-Ecological Systems. In : *Ecology and Society* [en ligne]. 2006. Vol. 11, n° 1. Disponible à l'adresse : <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art15/>.

JOST, Jean-Pierre et JOST, Yan-Chim, 2004. *Les marmottes - Milieu naturel, vie sociale et hibernation*. S.l. : Cabétia Editions. Regard et connaissance.

LANDOLT, Elias, BÄUMLER, Beat et CONSERVATOIRE ET JARDIN BOTANIQUES DE LA VILLE DE GENÈVE (éd.), 2010. *Flora indicativa: ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen = Ecological indicator values and biological attributes of the flora of Switzerland and the Alps*. 2., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Bern : Haupt. ISBN 978-3-258-07461-0.

LAVOREL, Sandra, BIERRY, Adeline et CROUZAT, Emilie, 2016. Gestion intégrée des territoires par une approche par les réseaux de services. In : *Sciences, Eaux & Territoires*. avril 2016. n° 21, pp. 10 à 17.

LAVOREL, Sandra, DÍAZ, Sandra, CORNELLISSEN, J. Hans C., GARNIER, Eric, HARRISSON, Sandy P., MCINTYRE, Sue, PAUSAS, Juli G., PÉREZ-HARGUINDEGUY, Natalia, ROUMET, Catherine et URCELAY, Carlos, 2007. Plant functional types: Are we getting any closer to the Holy Grail? In : *Terrestrial Ecosystems in A Changing World*. Berlin ; New York : Springer. Global change-the IGBP series. pp. 171-186. ISBN 978-3-540-32729-5. QH75 .T375 2007

LAVOREL, Sandra, GRIGULIS, Karl, LAMARQUE, Pénélope, COLACE, Marie-Pascale, GARDEN, Denys, GIREL, Jacky, PELLET, Gilles et DOUZET, Rolland, 2011. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services: Plant functional traits and provision of multiple ecosystem services. In : *Journal of Ecology*. janvier 2011. Vol. 99, n° 1, pp. 135-147. DOI 10.1111/j.1365-2745.2010.01753.x.

LAVOREL, Sandra, GRIGULIS, Karl, MCINTYRE, Sue, WILLIAMS, Nick S. G., GARDEN, Denys, DORROUGH, Josh, BERMAN, Sandra, QUÉTIER, Fabien, THÉBAULT, Aurélie et BONIS, Anne, 2007. Assessing functional diversity in the field – methodology matters! In : *Functional Ecology*. 22 novembre 2007. Vol. 0, n° 0, pp. 071124124908001-??? DOI 10.1111/j.1365-2435.2007.01339.x.

LIAW, Andy et WIENER, Matthew, 2002. Classification and Regression by randomForest. In : *R News*. 2002. Vol. 2, n° 3, pp. 18-22.

MALHI, Yadvinder, DOUGHTY, Christopher E., GALETTI, Mauro, SMITH, Felisa A., SVENNING, Jens-Christian et TERBORGH, John W., 2016. Megafauna and ecosystem function from the Pleistocene to the Anthropocene. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 26 janvier 2016. Vol. 113, n° 4, pp. 838-846. DOI 10.1073/pnas.1502540113.

MARTIN, Paul S. (éd.), 1995. *Quaternary extinctions: a prehistoric revolution*. 3. print. Tucson : Univ. of Arizona Press. ISBN 978-0-8165-1100-6.

METCALFE, Peter et BUYTAERT, Wouter, 1995. *upslope.area: Upslope contributing area and wetness index calculation in dynatopmodel: Implementation of the Dynamic TOPMODEL Hydrological Model* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 20 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://rdr.io/cran/dynatopmodel/man/upslope.area.html>.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (PROGRAM) (éd.), 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC : Island Press. ISBN 978-1-59726-040-4. GF50 .E269 2005

NAISMITH, W. W., 1892. *Excursions. Cruach Ardran, Stobinian, and Ben More - Scottish Mountaineering Club Journal* [en ligne]. S.l. : s.n. ISBN 978-1-147-50261-9. Disponible à l'adresse : <https://books.google.fr/books?id=mTjuAgAAQBAJ>.

OBSERVATOIRE DES GALLIFORMES DE MONTAGNE, [sans date]. Portail Carmen - Présence / Absence par unité naturelle de la Perdrix Bartavelle dans les Hautes-Alpes (Etat 2010). In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://carmen.carmencarto.fr/85/OGM003_BAR_05.map.

OBSERVATOIRE DES GALLIFORMES DE MONTAGNE, [sans date]. Portail Carmen - Présence / Absence par unité naturelle du Lagopède dans les Hautes-Alpes (Etat 2010). In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://carmen.carmencarto.fr/85/OGM019_LAG_05.map.

OBSERVATOIRE DES GALLIFORMES DE MONTAGNE, [sans date]. Portail Carmen - Présence / Absence par unité naturelle du Tétrás-Lyre dans les Hautes-Alpes (Etat 2010). In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://carmen.carmencarto.fr/85/OGM002_TLY_05.map.

OFB, [sans date]. Portail Carmen - Réseau Ongulés Sauvages. In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://carmen.carmencarto.fr/38/Ongules_sauvages.map#.

ONCFS, 2020. ONCFS. In : [en ligne]. avril 2020. Disponible à l'adresse : <http://www.oncfs.gouv.fr/>.

ORCHAMP-OSUG, [sans date]. Observatoire ORCHAMP. In : [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://orchamp.osug.fr/sites/18#>.

PIEDALLU, Christian et GÉGOUT, Jean-Claude, 2007. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. In : *Annals of Forest Science*. janvier 2007. Vol. 64, n° 8, pp. 899-909. DOI 10.1051/forest:2007072.

PINTON, Florence, 2018. Anthropologie de la Nature. In : . AgroParisTech centre de Nancy. novembre 2018.

SCHIRPKE, Uta, MEISCH, Claude, MARSONER, Thomas et TAPPEINER, Ulrike, 2018. Revealing spatial and temporal patterns of outdoor recreation in the European Alps and their surroundings. In : *Ecosystem Services*. juin 2018. Vol. 31, pp. 336-350. DOI 10.1016/j.ecoser.2017.11.017.

SCHIRPKE, Uta, TASSER, Erich et TAPPEINER, Ulrike, 2013. Predicting scenic beauty of mountain regions. In : *Landscape and Urban Planning*. mars 2013. Vol. 111, pp. 1-12. DOI 10.1016/j.landurbplan.2012.11.010.

SCHIRPKE, Uta, TIMMERMANN, Florian, TAPPEINER, Ulrike et TASSER, Erich, 2016. Cultural ecosystem services of mountain regions: Modelling the aesthetic value. In : *Ecological Indicators*. octobre 2016. Vol. 69, pp. 78-90. DOI 10.1016/j.ecolind.2016.04.001.

SCHMITZ, María F., ARNAIZ-SCHMITZ, Cecilia, HERRERO-JÁUREGUI, Cristina, DÍAZ, Pablo, MATOS, Daniela G.G. et PINEDA, Francisco D., 2018. People and nature in the Fuerteventura Biosphere Reserve (Canary Islands): socio-ecological relationships under climate change. In : *Environmental Conservation*. mars 2018. Vol. 45, n° 1, pp. 20-29. DOI 10.1017/S0376892917000169.

SHABANI, Farzin, KUMAR, Lalit et AHMADI, Mohsen, 2018. Assessing Accuracy Methods of Species Distribution Models: AUC, Specificity, Sensitivity and the True Skill Statistic. In : *Global Journal of Human-Social Sciences* [en ligne]. 2018. Vol. 18, n° 1. Disponible à l'adresse : https://globaljournals.org/GJHSS_Volume18/2-Assessing-Accuracy-Methods.pdf.

SOBERÓN, Jorge, 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. In : *Ecology Letters*. décembre 2007. Vol. 10, n° 12, pp. 1115-1123. DOI 10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x.

THUILLER, Wilfried, LAFOURCADE, Bruno, ENGLER, Robin et ARAÚJO, Miguel B., 2009. BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. In : *Ecography*. juin 2009. Vol. 32, n° 3, pp. 369-373. DOI 10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x.

UNION MONDIALE POUR LA NATURE et COMITÉ FRANÇAIS, 2014. *Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France. Volume 2.4. Les écosystèmes montagnards*. [en ligne]. Paris : Comité français de l'UICN. ISBN 978-2-918105-22-0. Disponible à l'adresse :

http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0076/Temis-0076929/20358_2_4.pdf.

VERNAY, Matthieu, LAFAYASSE, Matthieu, HAGENMULLER, Pascal, NHEILI, Rafife, VERFAILLIE, Deborah et MORIN, Samuel, 2019. *The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]*. AERIS. [en ligne]. 2019. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.25326/37>.

VIGL, Lukas, DEPELLEGRIN, Daniel, PEREIRA, Paulo, DE GROOT, Rudolf et TAPPEINER, Ulrike, 2017. Mapping the ecosystem service delivery chain: Capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. In : *Science of The Total Environment*. janvier 2017. Vol. 574, pp. 422-436. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.08.209.

VILLARET, Jean-Charles, ES, Jérémie van, SANZ, Thomas, PACHE, Gilles, LEGLAND, Thomas, MIKOLAJCZAK, Alexis, ABDULHAK, Sylvain, GARRAUD, Luc, LAMBHEY, Brigitte, VILLARET, Jean-Charles et MANNEVILLE, Olivier, 2019. *Guide des habitats naturels et semi-naturels des Alpes: du Jura méridional à la Haute Provence et des bords du Rhône au Mont-Blanc : description, écologie, espèces diagnostiques, conservation*. S.l. : s.n. ISBN 979-10-94583-30-2.

VITTOZ, Pascal et ENGLER, Robin, 2007. Seed dispersal distances: a typology based on dispersal modes and plant traits. In : *Botanica Helvetica*. décembre 2007. Vol. 117, n° 2, pp. 109-124. DOI 10.1007/s00035-007-0797-8.

VIVAT, Agnès, GILLOT, Philippe, ABDULHAK, Sylvain, SALLES, Jean-Marc et BARBERO, Marcel, 2014a. *Document d'Objectifs du site Natura 2000 « Clarée » (FR9301499). Fiches Habitats et Espèces* [en ligne]. 2014. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : http://hautes-alpes.n2000.fr/sites/hautes-alpes.n2000.fr/files/documents/page/Fiches_habitats_especes_2015_r.pdf.

VIVAT, Agnès, GILLOT, Philippe, ABDULHAK, Sylvain, SALLES, Jean-Marc et BARBERO, Marcel, 2014b. *Document d'Objectifs du site Natura 2000 « Clarée » (FR9301499). Tome 1 : Diagnostics, enjeux et objectifs de conservation* [en ligne]. 2014. S.l. : s.n. Disponible à l'adresse : http://hautes-alpes.n2000.fr/sites/hautes-alpes.n2000.fr/files/documents/page/docob_claree_t1_2015_r_0.pdf.

WEISS, Andrew, 2001. Topographic position and landforms analysis (poster). In : [en ligne]. S.l. 2001. Disponible à l'adresse : http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf.

WEISS, D. J., NELSON, A., GIBSON, H. S., TEMPERLEY, W., PEEDELL, S., LIEBER, A., HANCHER, M., POYART, E., BELCHIOR, S., FULLMAN, N., MAPPIN, B., DALRYMPLE, U., ROZIER, J., LUCAS, T. C. D., HOWES, R. E., TUSTING, L. S., KANG, S. Y., CAMERON, E., BISANZIO, D., BATTLE, K. E., BHATT, S. et GETHING, P. W., 2018. A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015. In : *Nature*. janvier 2018. Vol. 553, n° 7688, pp. 333-336. DOI 10.1038/nature25181.

WILLEMEN, Louise, VERBURG, Peter H., HEIN, Lars et VAN MENSVOORT, Martinus E.F., 2008. Spatial characterization of landscape functions. In : *Landscape and Urban Planning*. octobre 2008. Vol. 88, n° 1, pp. 34-43. DOI 10.1016/j.landurbplan.2008.08.004.

WINEMILLER, Kirk O., FITZGERALD, Daniel B., BOWER, Luke M. et PIANKA, Eric R., 2015. Functional traits, convergent evolution, and periodic tables of niches. In : ARITA, Hector (éd.), *Ecology Letters*. août 2015. Vol. 18, n° 8, pp. 737-751. DOI 10.1111/ele.12462.

Liste des contacts

Ninon Fontaine – stagiaire

ninon.fontaine.05@gmail.com

Isabelle Boulangeat – tuteur de stage

isabelle.boulangeat@inrae.fr

Christian Piedallu – enseignant référent

christian.piedallu@agroparistech.fr

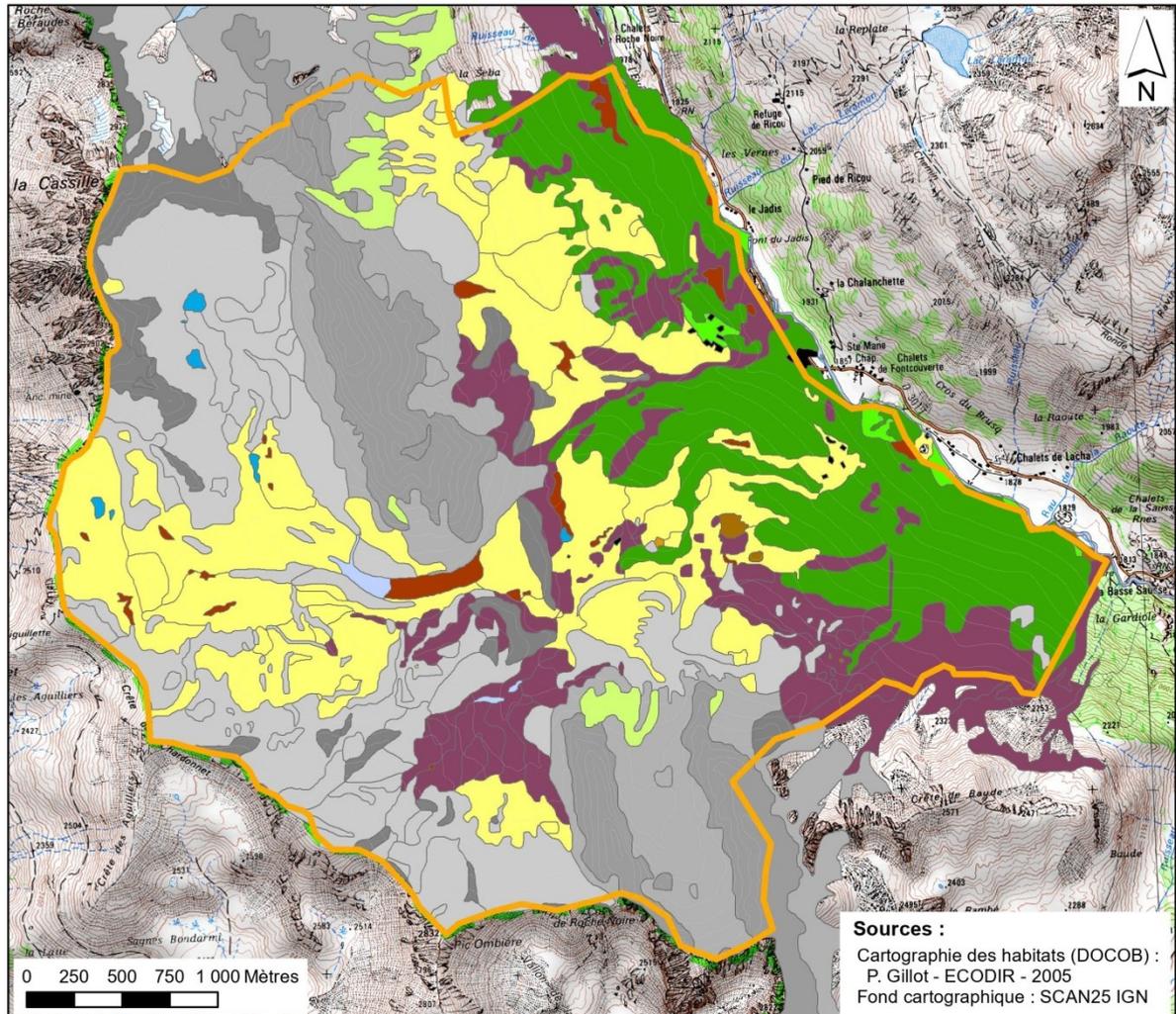
Annexes

Annexe 0	Atlas cartographique et photographique.....	77
Annexe 1	Zonages environnementaux présents sur la zone d'étude (Vivat et al., 2014 - Tome 1 du DOCOB ; INPN-MNHN - https://inpn.mnhn.fr/collTerr/commune/choix/05093).....	82
Annexe 2	Codage des formes de relief (selon Weiss, 2001)	82
Annexe 3	Attribution de notes fonctionnelles aux habitats Natura 2000 en présence.....	83
Annexe 4	ACP des caractéristiques des pixels de l'unité pastorale suivant les sept dimensions cadrant l'analyse.....	86
Annexe 5	Représentation cartographique des caractéristiques des pixels de l'unité pastorale suivant les sept dimensions cadrant l'analyse.....	90
Annexe 6	Qualité de représentation des quatorze sous-dimensions sur les trois premiers axes de l'ACP. 93	93
Annexe 7	Représentation cartographique des caractéristiques des pixels de l'unité pastorale, en éclatant la coloration pour chacune des saisons.	94
Annexe 8	Indicateurs utilisés pour évaluer les modèles d'usage.	96
Annexe 9	Hypothèses concernant la présence / absence des usages, en fonction des caractéristiques fonctionnelles des pixels.....	98
Annexe 10	Evaluation des modèles de présence / absence des usages.....	104
Annexe 11	Localisation des couchades prédites à partir des modèles GLM et RF, par rapport aux couchades effectives.....	106
Annexe 12	Degré des nœuds « pixels » dans les réseaux bipartis pixels-usages, selon si seulement les usages humains ou seulement les usages animaux sont considérés.....	107

Annexe 0 Atlas cartographique et photographique

Dans l'ordre : Habitats Natura 2000 – Usages par les ongulés et galliformes – Usages pastoraux – Usages récréatifs – Présentation photographique de la zone d'étude.

Habitats Natura 2000 sur la zone d'étude



Légende

 Unité pastorale du Chardonnet

Habitats N2000 (DOCOB)

 Eaux stagnantes, oligotrophes à mésotrophes avec végétation des Littorelletea uniflorae et/ou des Isoeto-Nanojuncetea

 Eboulis calcaires et de schistes calcaires des étages montagnard à alpin (Thlaspietea rotundifolii)

 Eboulis siliceux de l'étage montagnard à nival (Androsacetalia alpinae et Galeopsietalia ladani)

 Formations herbueses à Nardus, riches en espèces, sur substrats siliceux des zones montagnardes (et des zones submontagnardes de l'Europe continentale)

 Forêts alpines à Larix decidua et/ou Pinus cembra

 Landes alpines et boréales

 Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin

 Pelouses calcaires alpines et subalpines

 Pentès rocheuses calcaires avec végétation chasmophytique

 Pentès rocheuses siliceuses avec végétation chasmophytique

 Prairies de fauche de montagne

 Rivières alpines avec végétation ripicole herbacée

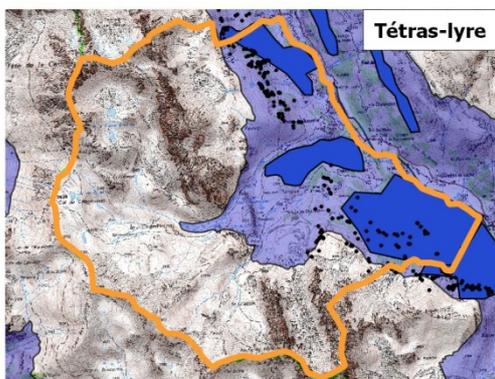
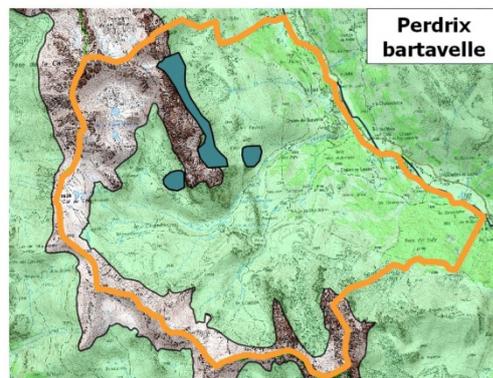
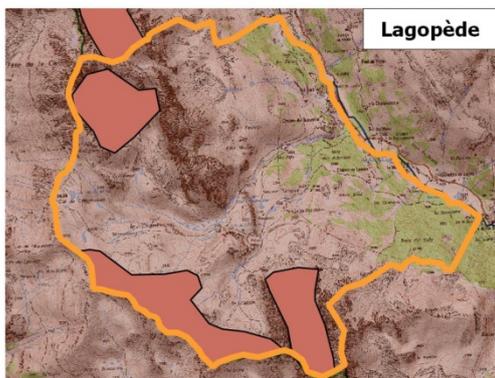
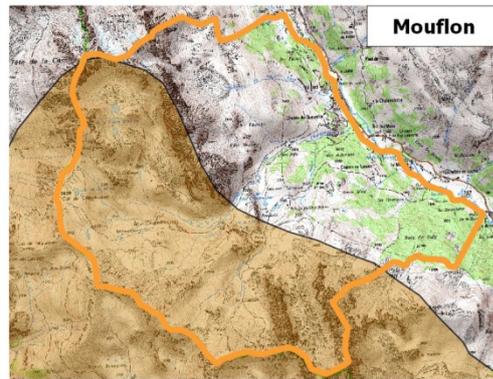
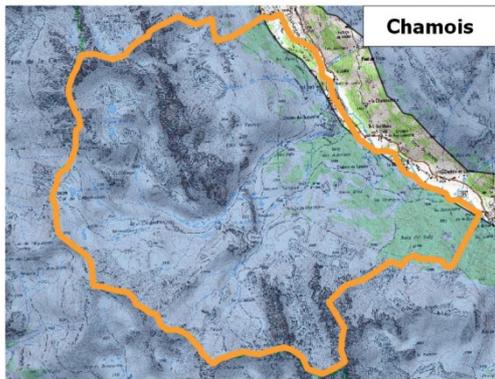
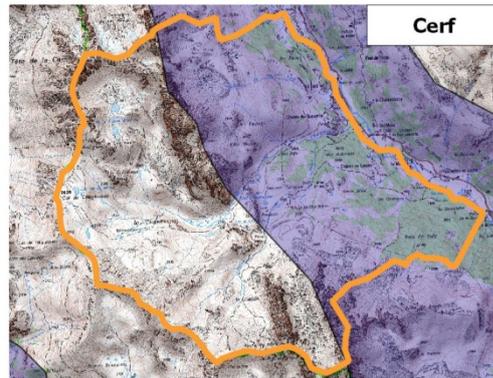
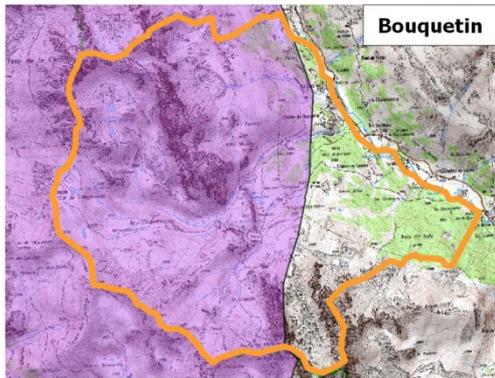
 Rivières alpines avec végétation ripicole ligneuse à Salix elaeagnos

 Tourbières basses alcalines

 Tourbières de transition et tremblantes

 Zones artificialisées

Usages par les espèces animales, ongulés et galliformes



Légende

- Unité pastorale du Chardonnet
- Semi-transparent : espace vital de l'espèce, ongulé ou galliforme
- Opaque : zone de nidification du galliforme
- Crottier de tétras-lyre

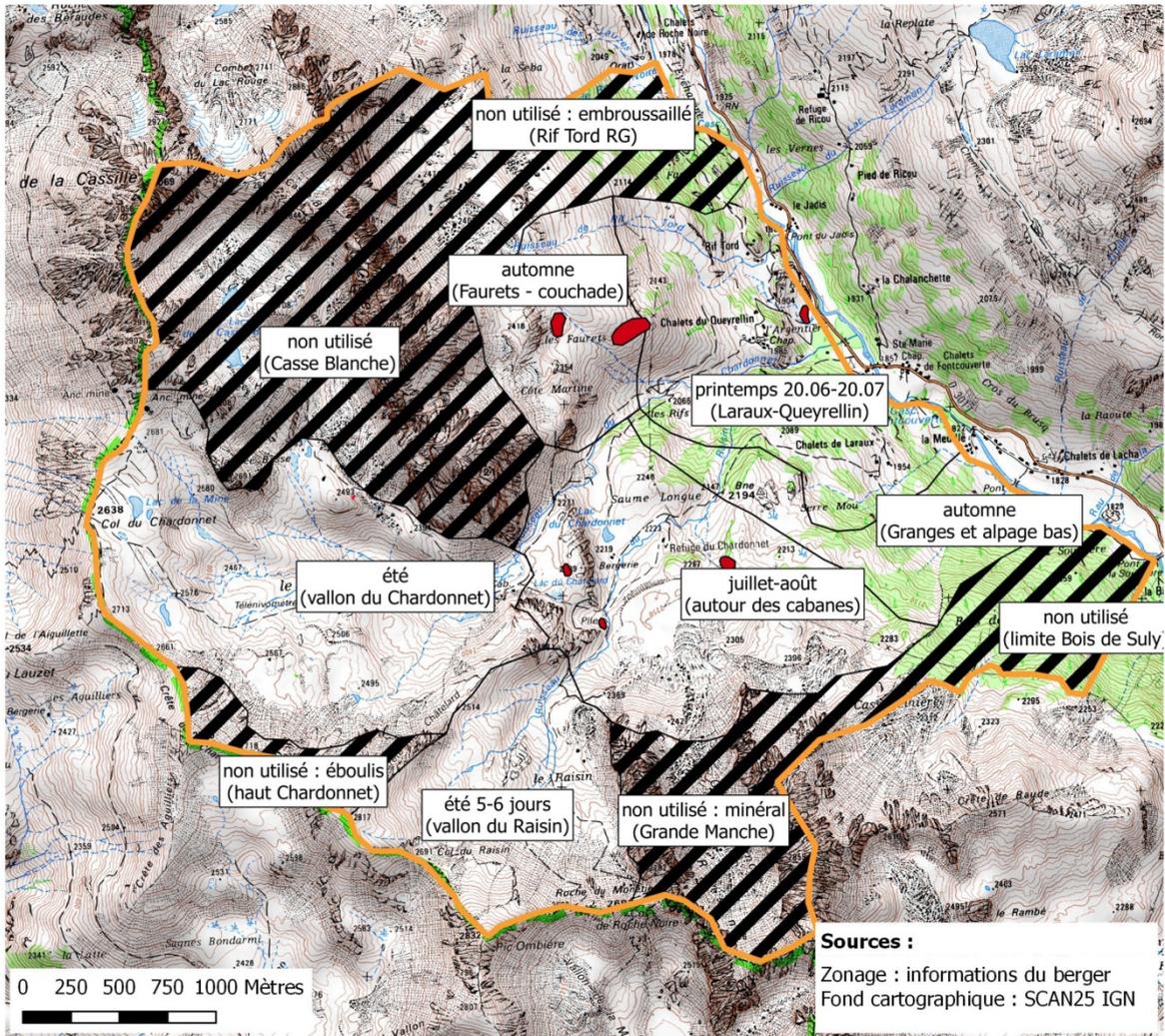
Sources :

Espaces vitaux : ONCFS
 Zones de nidification et crottiers :
 Natura 2000 Clarée
 Fond cartographique : SCAN25 IGN

0 0.5 1 km



Usages pastoraux



Légende

 Unité pastorale du Chardonnet

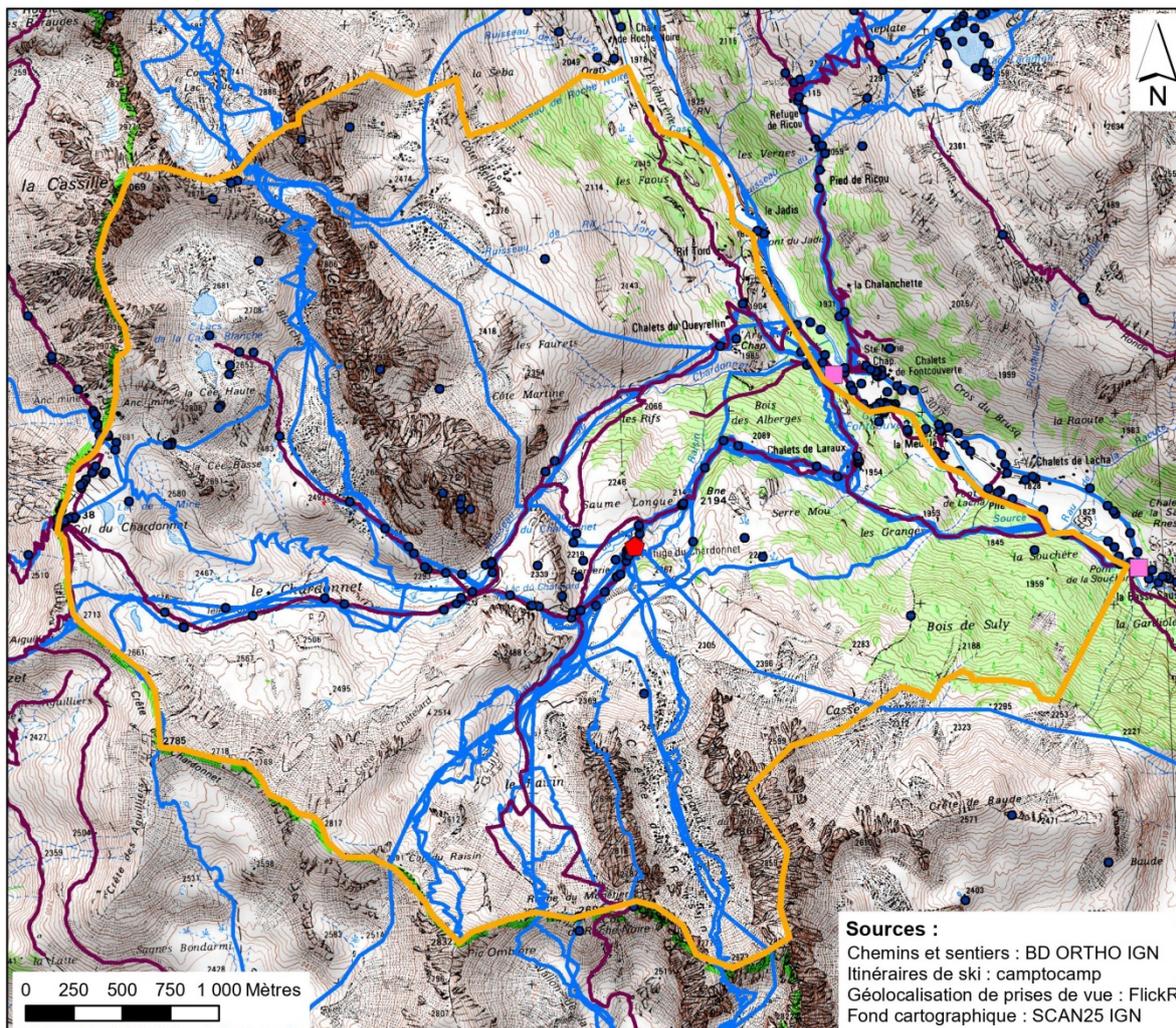
 Usage en couchades

Usage en pâture

 non utilisé

 utilisé

Usages récréatifs : itinéraires et prises de vue



Légende

 Unité pastorale du Chardonnet

 Chemins et sentiers de randonnée

 Itinéraires de ski de randonnée

 Géolocalisation des photographies FlickrR

 Parkings

 Refuge du Chardonnet



De nombreuses zones rocheuses et éboulis



Quelques zones humides et tourbières



Des mosaïques de landes, forêts et pelouses



Des chalets résidentiels, sur des zones plus artificialisées



Un refuge ouvert en été et en hiver
(© Refuge du Chardonnet)



Un site propice aux randonnées familiales,
avec ou sans ânes

**Annexe 1 Zonages environnementaux présents sur la zone d'étude
(Vivat et al., 2014 - Tome 1 du DOCOB ; INPN-MNHN -
<https://inpn.mnhn.fr/collTerr/commune/choix/05093>)**

Type de zonage	Code	Nom
Site Natura 2000	FR9301499	Clarée
ZNIEFF de type 2	930012793	Massif des Cerces – Mont Thabor – Vallées Etroite et de la Clarée
ZNIEFF de type 1	930020102	Massif des Cerces – Grand Lac de Monétier –Aiguillette du Lauzet – Col du Chardonnet – Tête de la Cassille
ZNIEFF de type 1	930020384	Zones humides du pont de la Souchère

Annexe 2 Codage des formes de relief (selon Weiss, 2001)

Code de forme	Relief correspondant
0	<i>Canyons, deeply incised streams</i> Canyons et cours d'eau encaissés
1	<i>Midslope drainages, shallow valleys</i> Bassins à mi-pente, vallées peu profondes
2	<i>Upland drainages, headwaters</i> Bassins de haut de pente, cours supérieurs
3	<i>U-shape valleys</i> Vallées en U
4	<i>Plains</i> Plaines
5	<i>Open slopes</i> Pentes dénudées
6	<i>Upper slopes, mesas</i> Hauts de pente, mesas
7	<i>Local ridges, hills in valleys</i> Crêtes locales, collines en vallée
8	<i>Midslope ridges, small hills in plains</i> Crêtes à mi-pente, petites collines de plaine
9	<i>Mountain tops, high ridges</i> Sommets, hautes crêtes

Annexe 3 Attribution de notes fonctionnelles aux habitats Natura 2000 en présence

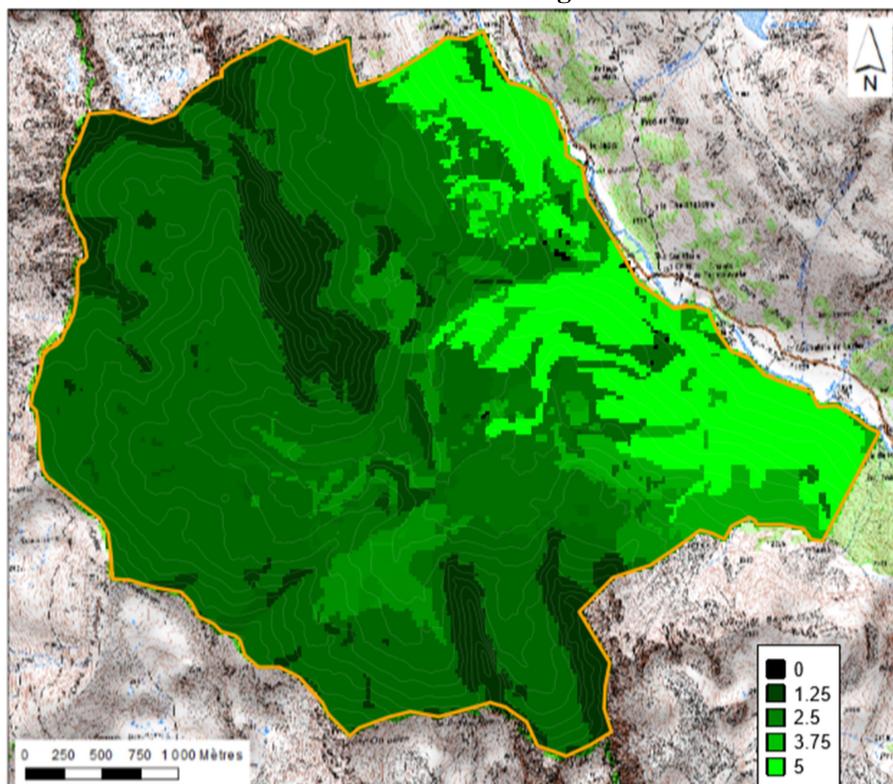
L'attribution de notes fonctionnelles est basée sur la description des cahiers d'habitats Natura 2000. La signification de chacune des notes est précisée dans le second tableau. Deux exemples illustrent la méthode, via la représentation cartographique des notes obtenues pour chaque pixel.

Code de l'habitat	Nom de l'habitat	Nombre de strates de végétation	Lignosité	Appétence	Diversité alimentaire hivernale	Diversité alimentaire estivale	Hauteur de la végétation (non arborée)	Pourcentage de sol nu	Caractère caillouteux ou rocheux	Caractère coloré de la végétation	Vitesse à plat	pH bioindiqué	Trophie bioindiquée	Préférence de lumière bioindiquée
3130	Eaux stagnantes, oligotrophes à mésotrophes avec végétation des Littorelletea uniflorae et/ou des Isoeto-Nanojuncetea	1	1	1	1	1	-	0	non	1	0,001	2,5	2,5	4,3
3220	Rivières alpines avec végétation ripicole herbacée	3	1	1	1	1	30	40	caill.	2	3	4,3	2,7	4
3240	Rivières alpines avec végétation ripicole ligneuse à Salix elaeagnos	4	3	1	2	2	100	40	caill.	1	3	3,7	2,3	3,7
4060	Landes alpines et boréales	3	3	1	3	3	30	5	non	2	3	2,7	1,8	3,5
6150	Pelouses boréo-alpines siliceuses	2	1	2	1	2	5	15	non	2	4,86	2,2	2,1	4,6
6170	Pelouses calcaires alpines et subalpines	2	1	3	1	2	30	10	non	3	4,86	3,9	2,2	4,3
6230	Formations herbeuses à Nardus, riches en espèces, sur substrats siliceux des zones montagnardes (et des zones submontagnardes de l'Europe continentale)	2	1	2	1	2	30	5	non	2	4,86	2,7	2,4	3,8
6430	Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin	4	1	2	2	3	100	0	non	2	3	3,3	3,9	2,9
6520	Prairies de fauche de montagne	3	1	3	2	3	100	0	non	3	4,2	3,3	3,1	3,6
7140	Tourbières de transition et tremblantes	3	1	1	1	1	30	0	non	2	0,001	2,3	2	4
7230	Tourbières basses alcalines	2	1	1	1	1	30	0	non	2	0,001	3,6	2,2	4,1
8110	Eboulis siliceux de l'étage montagnard à nival (Androsacetalia alpinae et Galeopsietalia ladani)	2	1	1	1	1	30	90	caill.	2	3	2,5	2,8	3,2
8120	Eboulis calcaires et de schistes calcaires des étages montagnard à alpin (Thlaspietea rotundifolii)	2	1	1	1	1	5	75	caill.	2	3	4,2	2,6	4,2
8210	Pentes rocheuses calcaires avec végétation chasmophytique	1	1	1	1	1	5	90	roch.	1	4,86	4,3	2,2	3,6
8220	Pentes rocheuses siliceuses avec végétation chasmophytique	1	1	1	1	1	5	95	roch.	1	4,86	2	2	4
9420	Forêts alpines à Larix decidua et/ou Pinus cembra	5	2	2	3	3	100	0	non	3	3,24	2,4	2,4	3,4

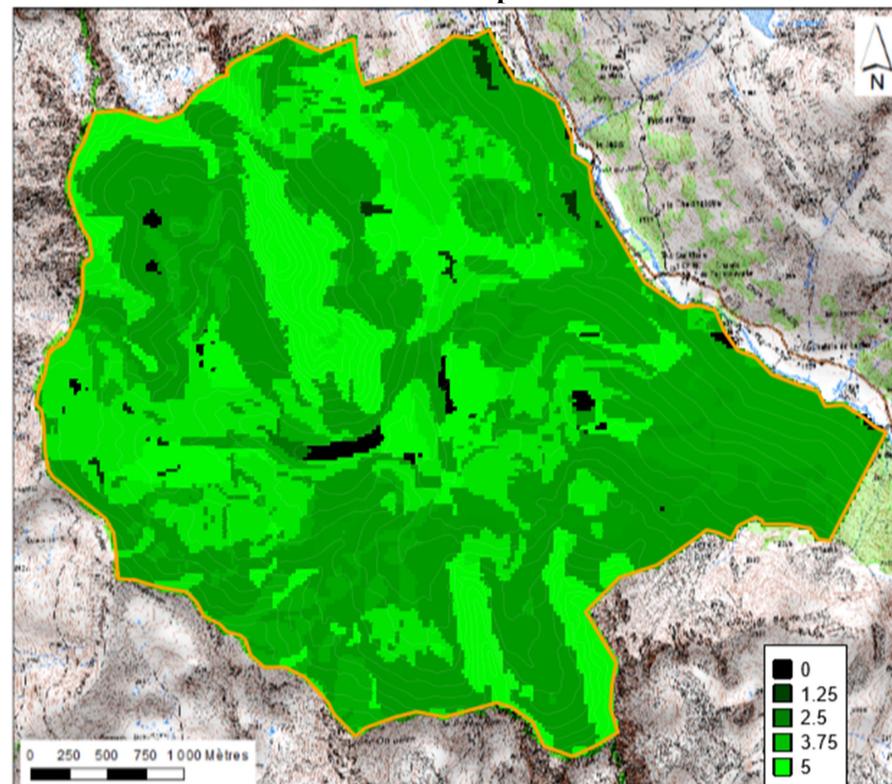
code de la variable	Signification de la variable	valeur possible 1	valeur possible 2	valeur possible 3	valeur possible 4	valeur possible 5	valeur possible 6
nombre_strates	nombre de strates parmi la liste suivante :	muscinal ou à port prostré/en coussinet (<10cm)	strate basse (10-20cm)	strate moyenne (20-50cm)	strate moyenne à arbustive (50cm-1m50)	strate arbustive haute (1m50-4m)	strate arborée haute (>4m)
lignosite	lignosité de la strate accessible aux herbivores (<1m50)	1 (faible lignosité : < 20% du couvert)	2 (lignosité moyenne : 20-50% du couvert)	3 (lignosité forte : > 50%)			
appetence	appétence de la strate accessible aux herbivores (<1m50) pour le bétail (principalement ovin)	1 (faible)	2 (moyenne)	3 (forte)			
quali_alim_hiver	Diversité alimentaire associée à l'habitat en saison hivernale, en se basant sur la diversité potentielle de nourriture (rameaux, aiguilles, bourgeons, végétaux persistants, herbacées sèches restant l'hiver...)	1 (faible diversité alimentaire)	2 (diversité alimentaire moyenne)	3 (forte diversité alimentaire)			
quali_alim_ete	Diversité alimentaire associée à l'habitat en saison estivale, en se basant sur la diversité potentielle de nourriture (arthropodes, baies, fleurs, graines, herbacées riches, ...)	1 (faible diversité alimentaire)	2 (diversité alimentaire moyenne)	3 (forte diversité alimentaire)			
hauteur_veg_horsArbo	classes de hauteur de la végétation	5 (basse : < 10cm)	30 (moyenne : entre 10 et 50cm)	100 (haute : >50 cm)	vide si non pertinent (végétation des cours d'eau notamment)		
pourc_sol_nu	pourcentage moyen de sol nu	pourcentage					
carac_caillouteux_rocheux	caractère caillouteux ou rocheux de l'habitat	caillouteux (roche discontinue sur plus de la moitié du pixel)	rocheux (roche continue sur plus de la moitié du pixel)	non (aucun des critères précédents)			
trophie_sol	richesse trophique du sol	1 (très oligotrophe à oligotrophe)	2 (oligotrophe à mésotrophe)	3 (mésotrophe à eutrophe)			
acidite_sol	acidité du sol	1 (très acide à acide)	2 (acide à neutre)	3 (neutre à basique)	4 (basique à très basique)		
carac_azote_sol	caractère azoté du sol	1 (non nitrophile)	2 (mésotrophile)	3 (nitrophile)			
veg_coloree_dansTemps	présence de végétation colorée/diversifiée qui persiste au cours de la saison estivale	1 (peu fleurie)	2 (moyennement fleurie ou floraison très restreinte dans le temps)	3 (fortement fleurie et floraison qui persiste dans le temps)			
vitesse_a_plat	vitesse d'un marcheur dans ce type d'habitat s'il était à plat	vitesse en km/h (adaptée de Weiss et al. 2020 où la vitesse a été estimée par des sondages/questionnaires auprès d'usagers)					

Exemples de variables interprétées à partir des habitats Natura 2000, dominants, secondaires et tertiaires sur chaque pixel

Nombre de strates de végétation



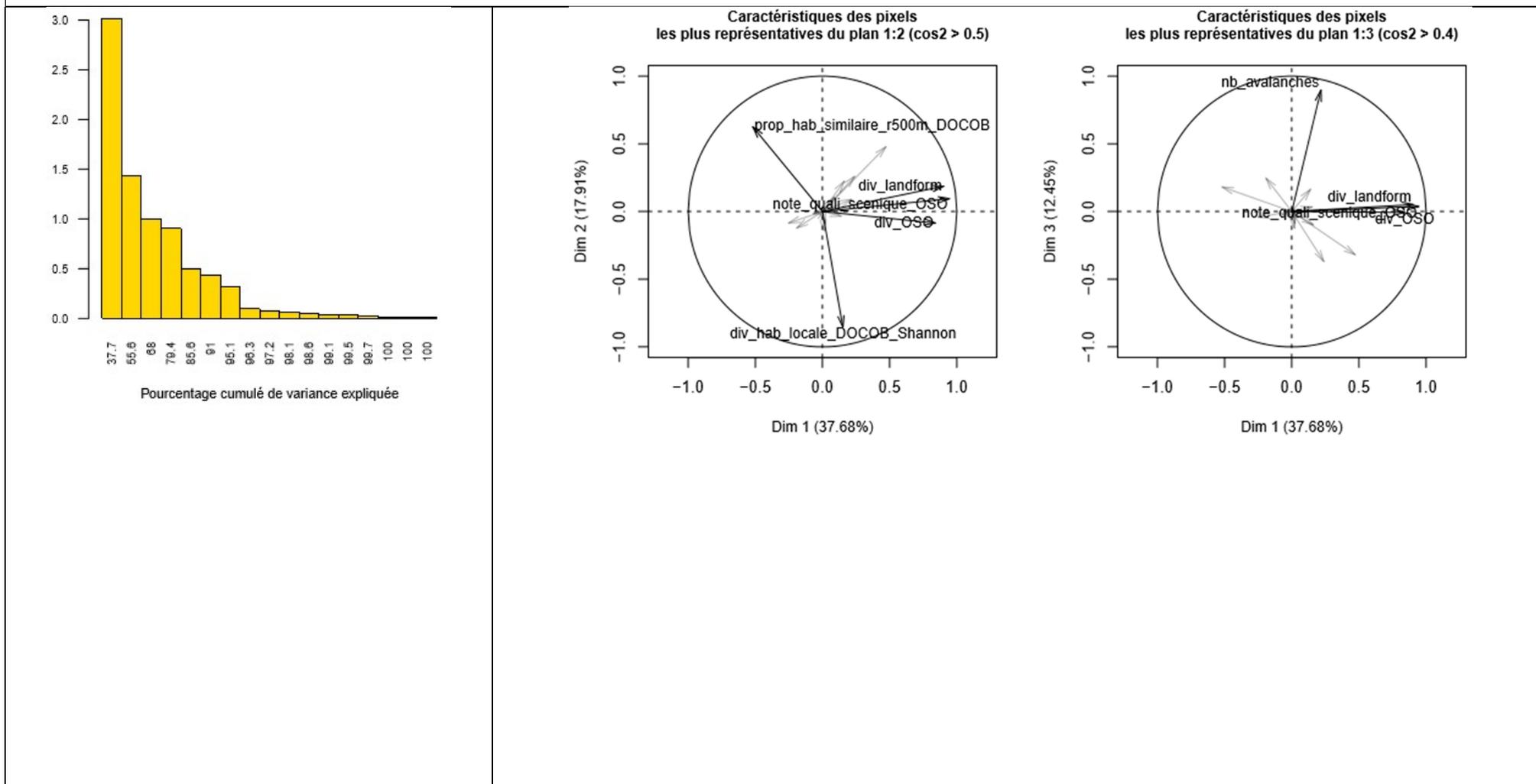
Vitesse à plat



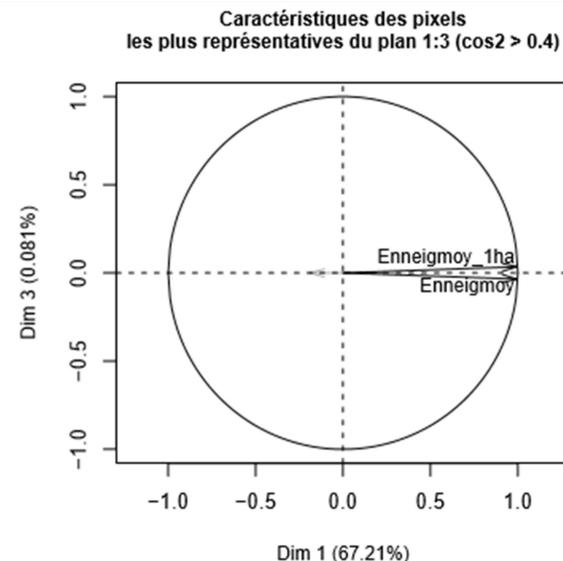
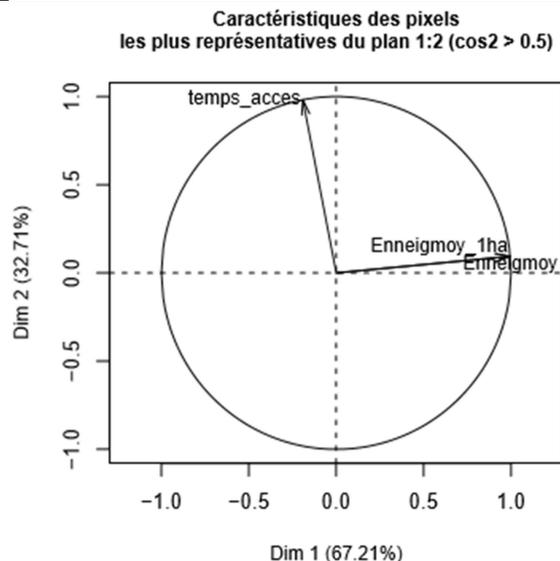
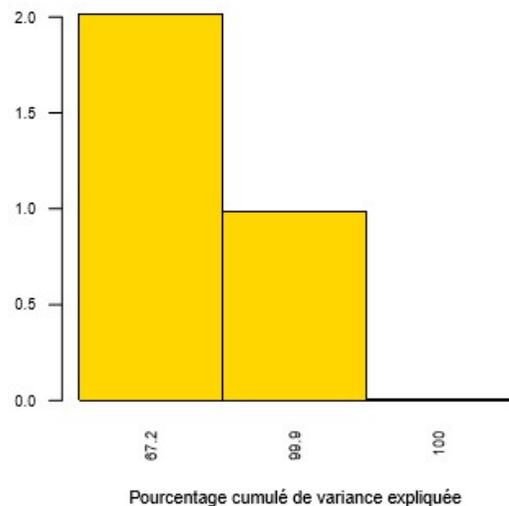
Annexe 4 ACP des caractéristiques des pixels de l'unité pastorale suivant les sept dimensions cadrant l'analyse

Des ACP sont réalisées sur les caractéristiques des couples pixel-saison regroupées en sept dimensions. Le choix du nombre d'axes à retenir se base sur l'éboulis des valeurs propres. Chaque axe retenu est nommé selon les variables qui lui sont corrélées.

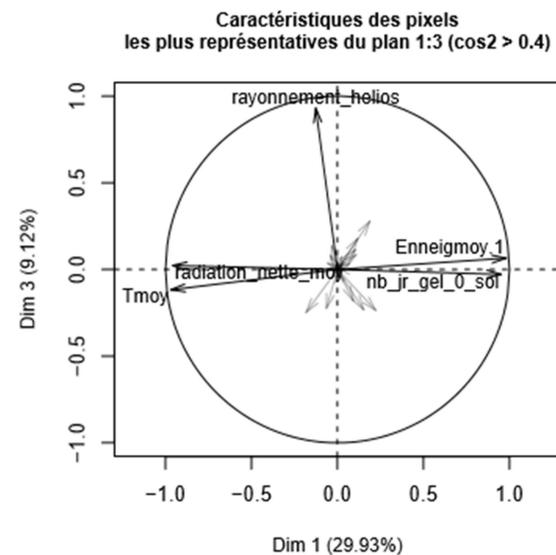
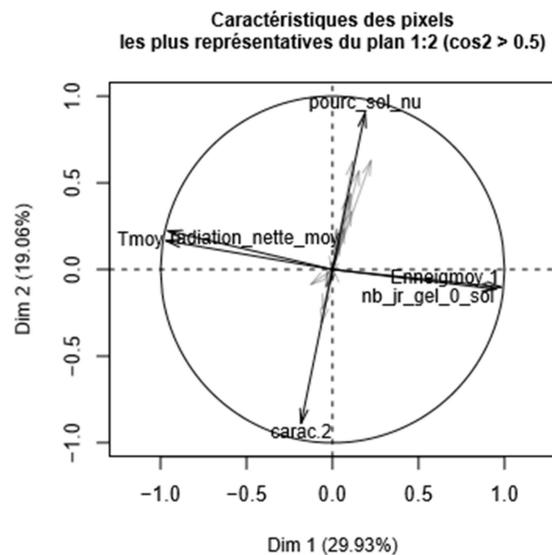
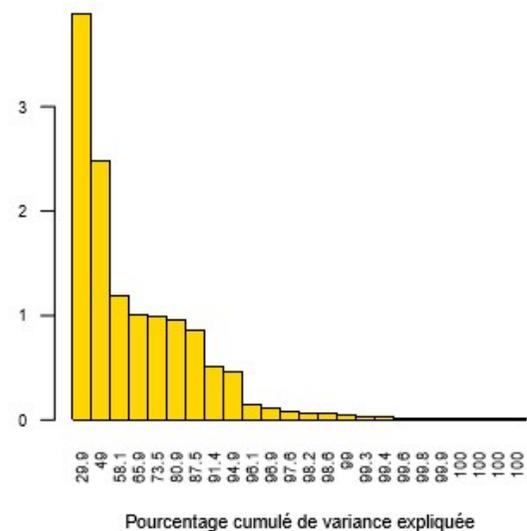
Dimension 1 : Contexte spatial des pixels (3 axes retenus sur l'ACP)



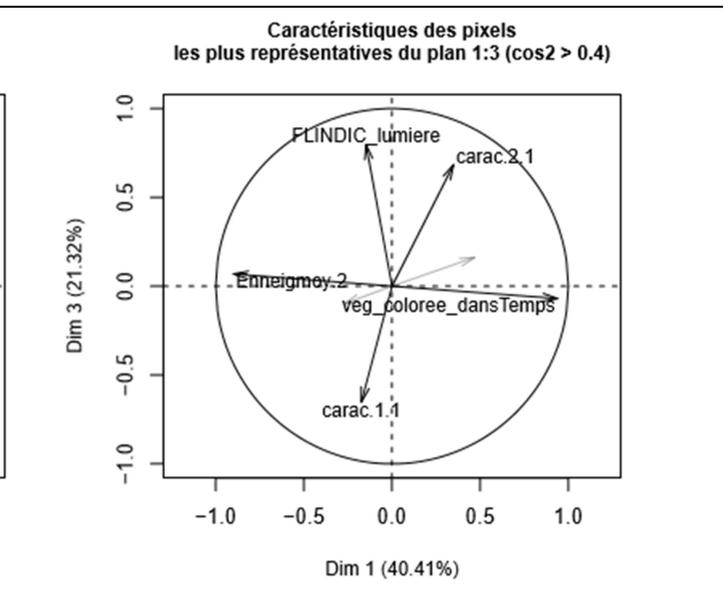
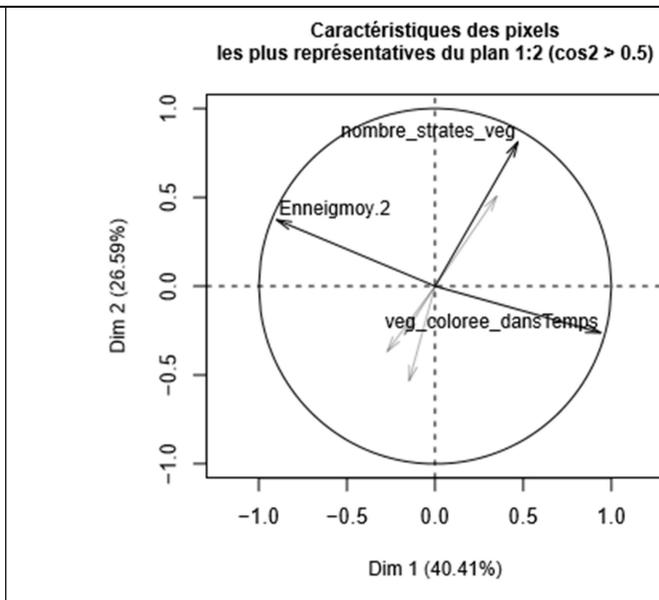
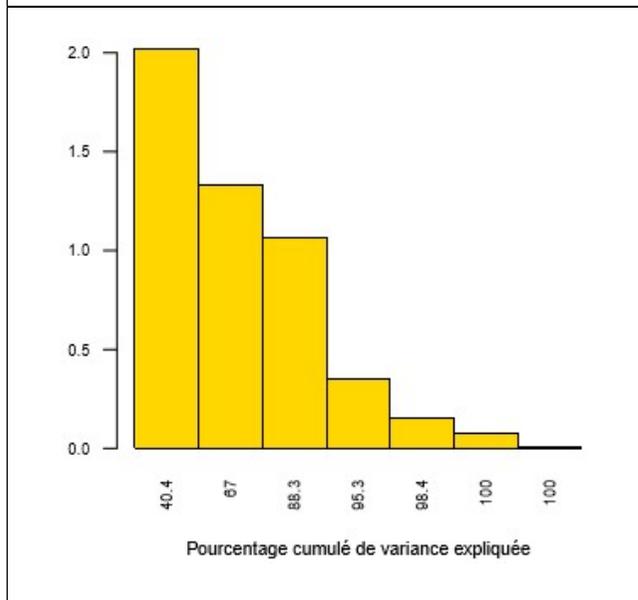
Dimension 2 : Accessibilité des pixels pour les usagers (2 axes retenus sur l'ACP)



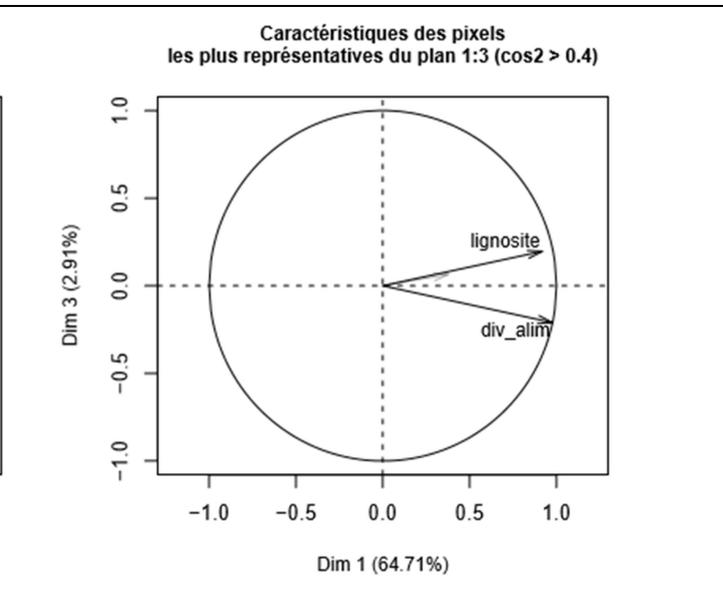
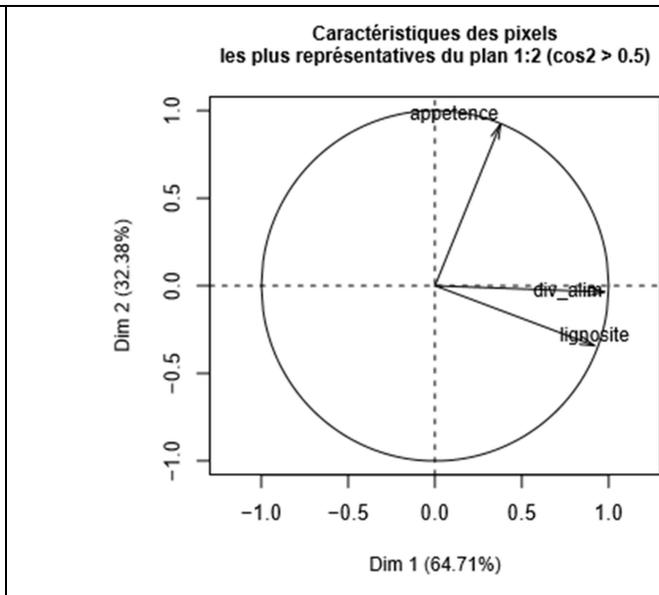
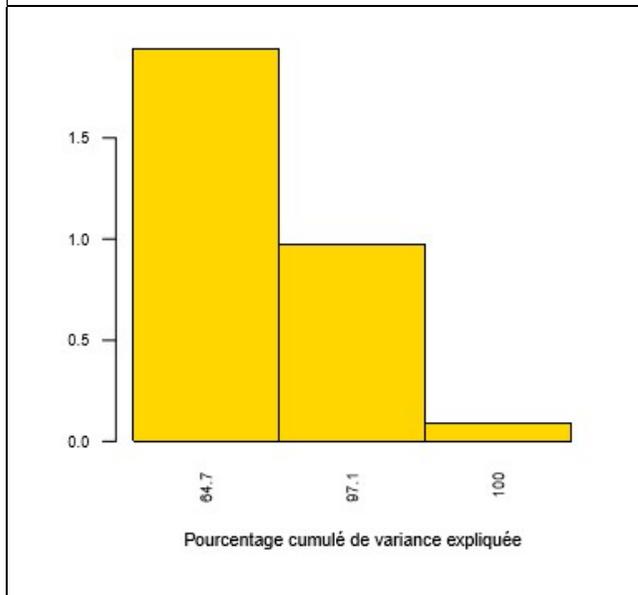
Dimension 3 : Caractéristiques géophysiques des pixels (2 axes retenus sur l'ACP)



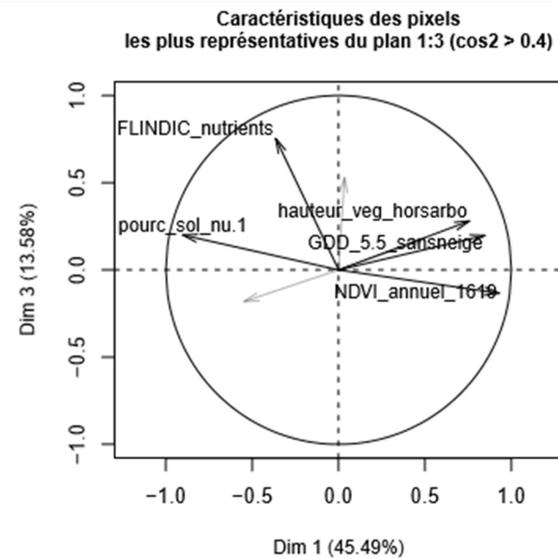
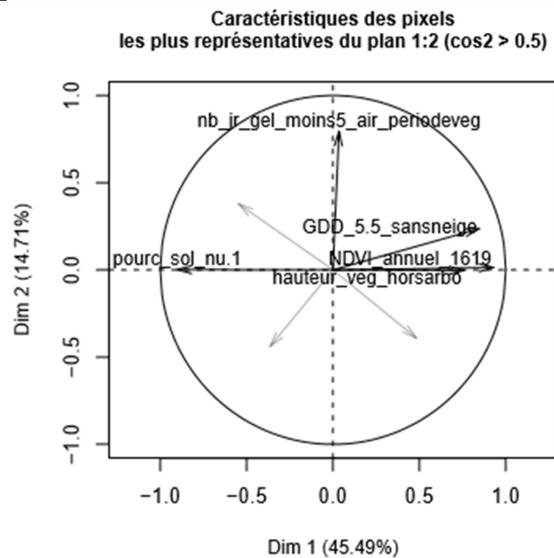
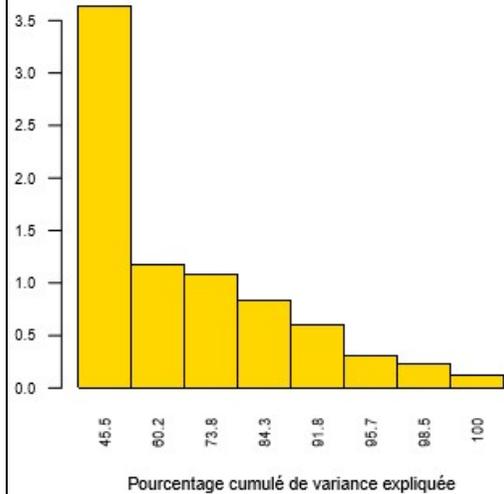
Dimension 4 : Ressources non consommables présentes sur les pixels (3 axes retenus sur l'ACP)



Dimension 5 : Qualité des ressources consommables présentes sur les pixels (2 axes retenus sur l'ACP)



Dimension 6 : Quantité de ressources consommables présente sur les pixels (1 axe retenu sur l'ACP)

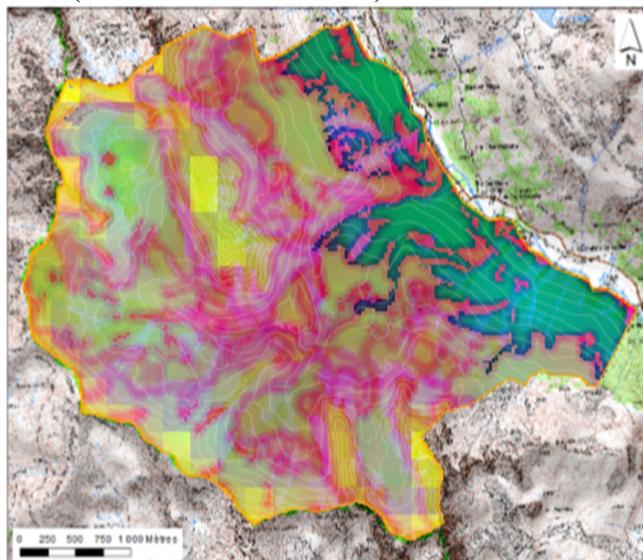
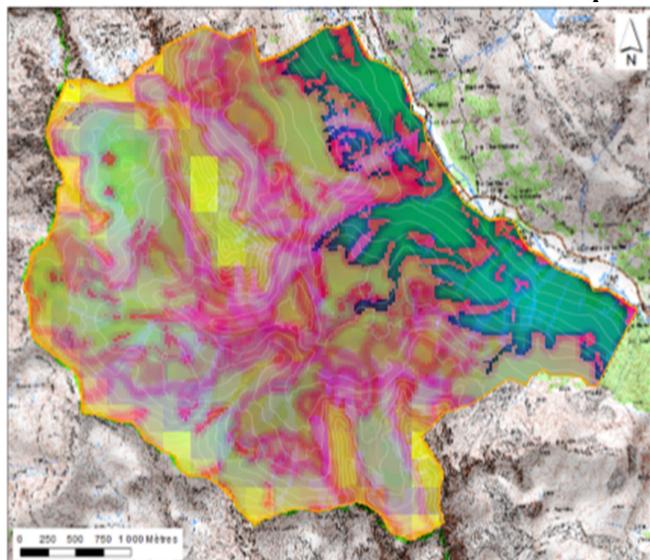


Annexe 5 Représentation cartographique des caractéristiques des pixels de l'unité pastorale suivant les sept dimensions cadrant l'analyse

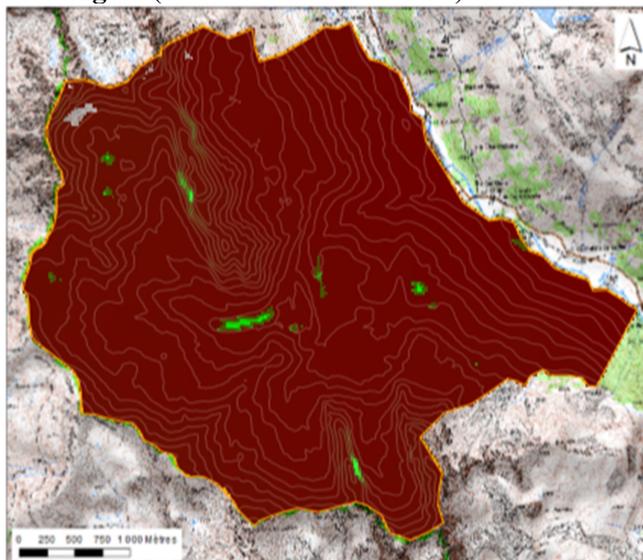
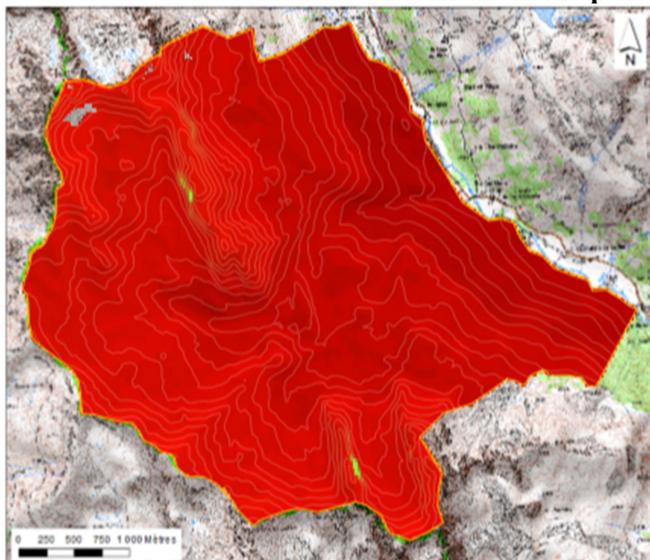
Des ACP sont réalisées sur les caractéristiques des couples pixel-saison regroupées en sept dimensions, et seuls les axes principaux sont retenus. Les coordonnées des couples pixel-saison sur ces axes principaux sont ensuite codées en RVB (valeurs décomposées sur trois gradients de 0 à 255). Si un ou deux axes seulement sont retenus, V et/ou B sont fixés à 0 pour tous les pixels, et seul R ou RV varie.

Les cartes sur la colonne de gauche correspondent aux caractéristiques hivernales des pixels, les cartes sur la colonne de droite correspondent à leurs caractéristiques estivales. Le fond de carte est issu de l'IGN, et les lignes de niveau sont espacées de 50 m d'altitude.

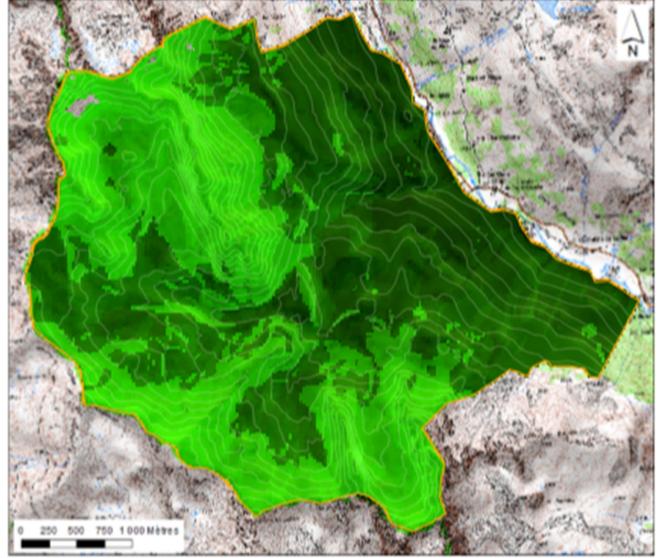
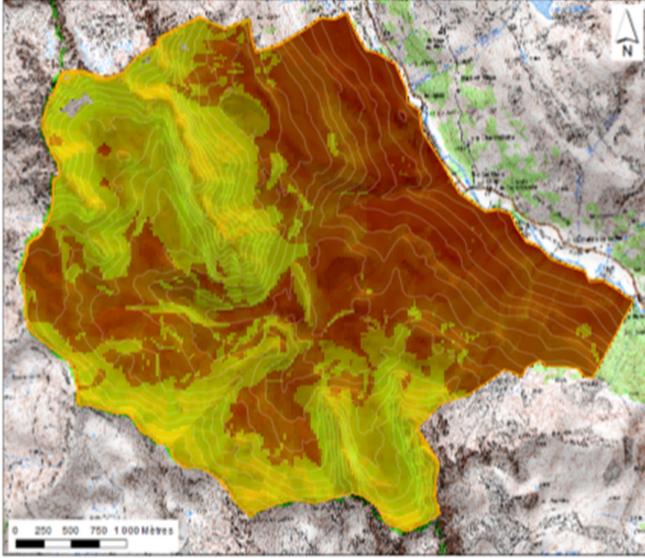
Dimension 1 : Contexte spatial des pixels (3 axes retenus sur l'ACP)



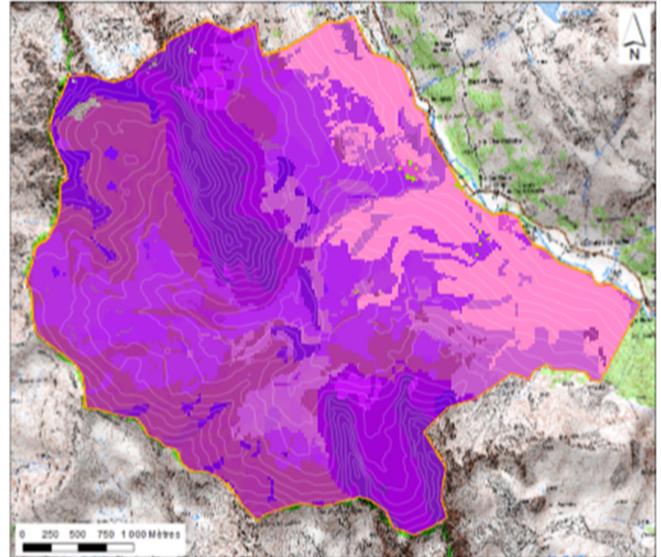
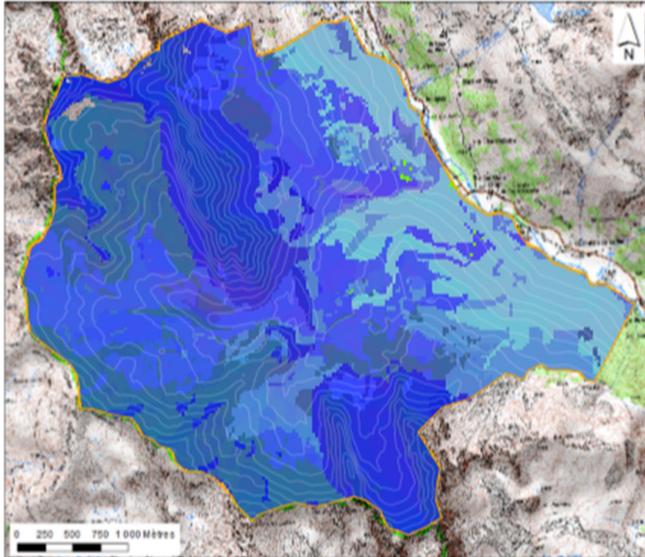
Dimension 2 : Accessibilité des pixels pour les usagers (2 axes retenus sur l'ACP)



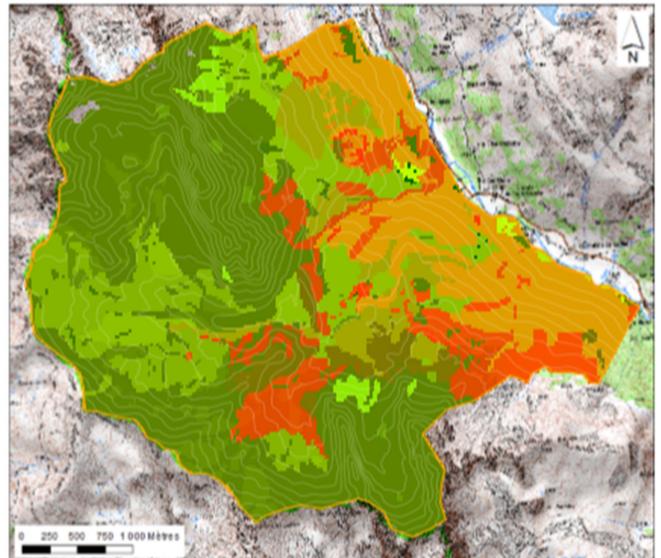
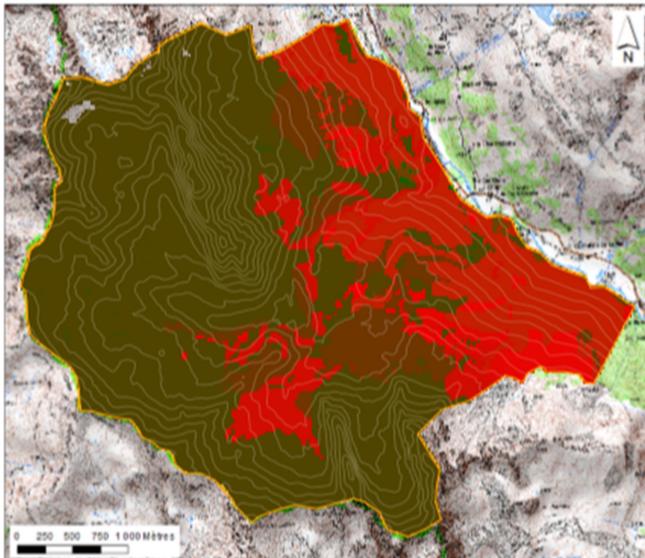
Dimension 3 : Caractéristiques géophysiques des pixels (2 axes retenus sur l'ACP)



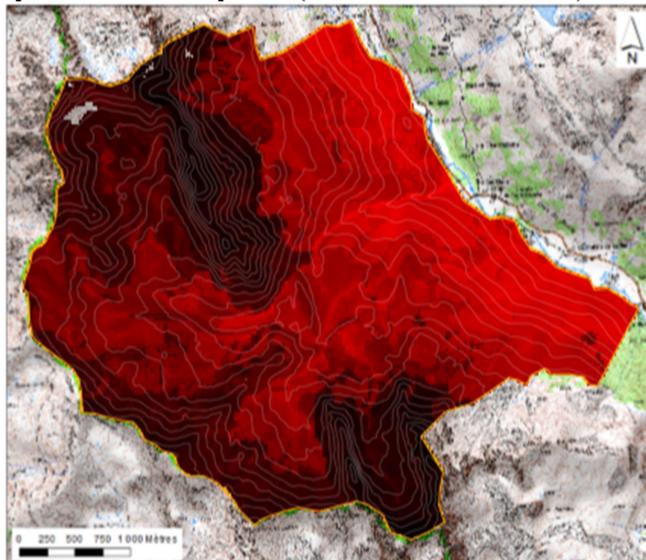
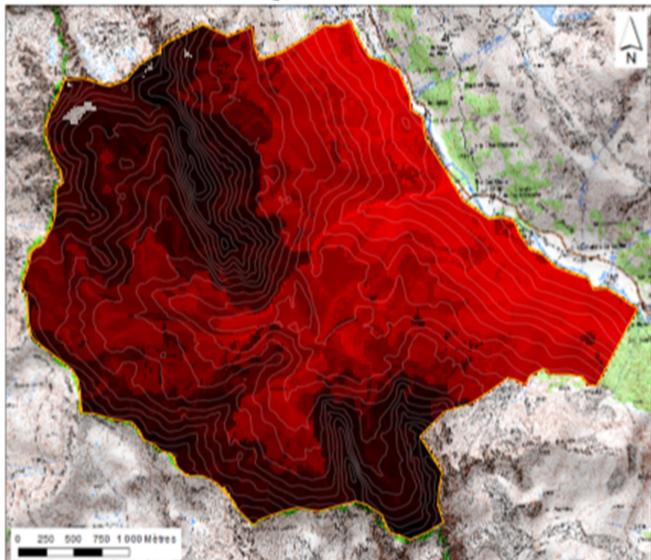
Dimension 4 : Ressources non consommables présentes sur les pixels (3 axes retenus sur l'ACP)



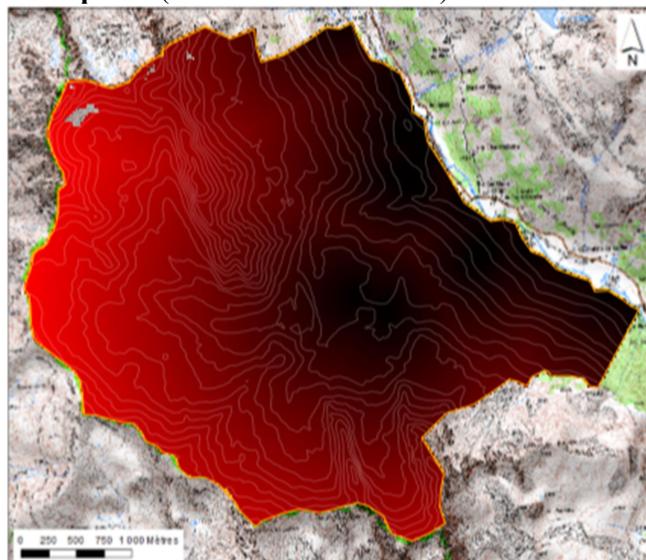
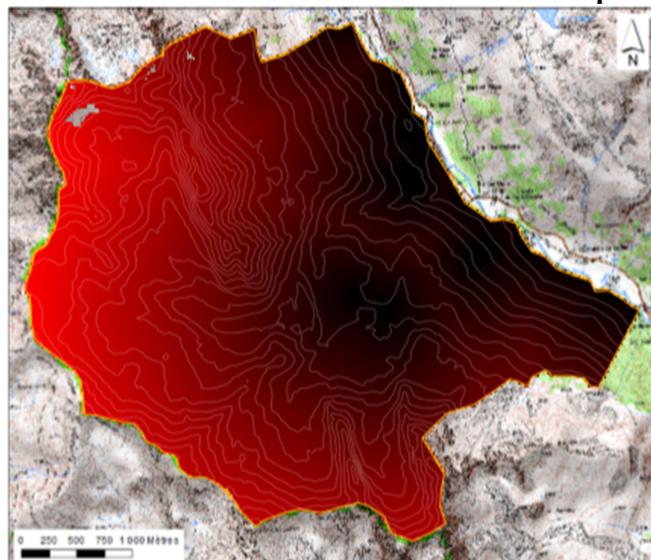
Dimension 5 : Qualité des ressources consommables présentes sur les pixels (2 axes retenus sur l'ACP)



Dimension 6 : Quantité de ressources consommables présente sur les pixels (1 axe retenu sur l'ACP)

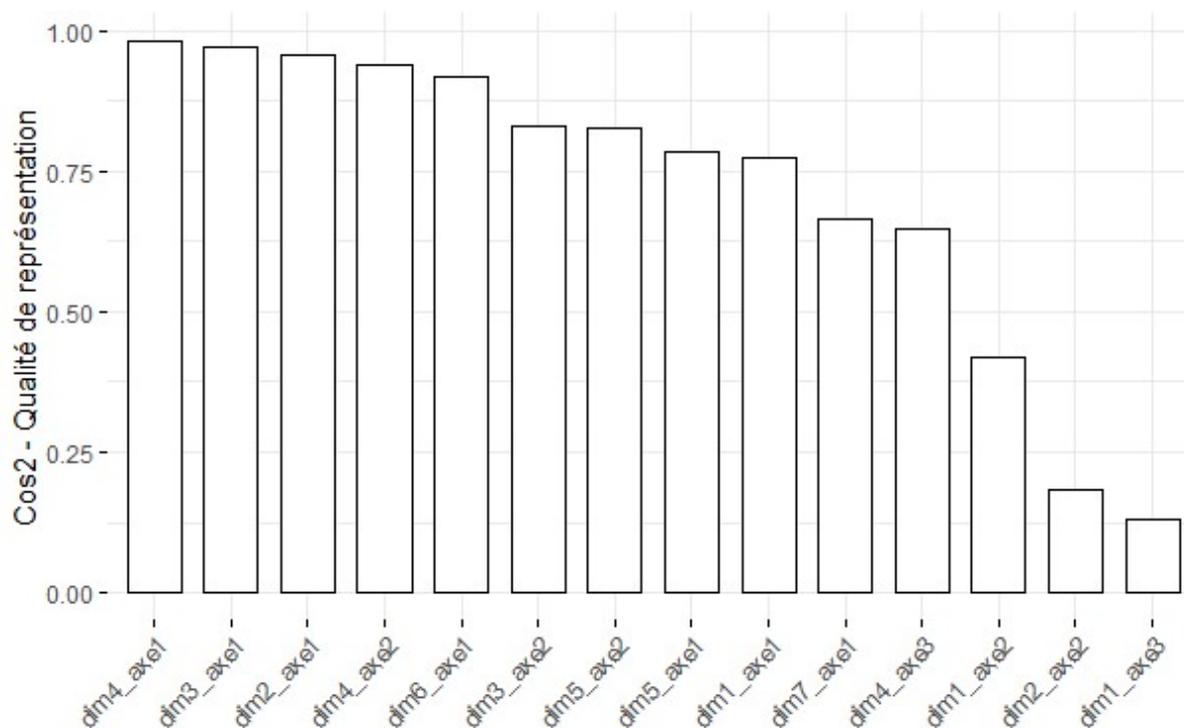


Dimension 7 : Infrastructures présentes sur les pixels (1 axe retenu sur l'ACP)



Annexe 6 Qualité de représentation des quatorze sous-dimensions sur les trois premiers axes de l'ACP.

Une ACP est réalisée sur les quatorze sous-dimensions fonctionnelles permettant de caractériser les couples pixel-saison. Sur cette ACP, les trois premiers axes sont retenus, ce qui représente 71.6 % de la variance. Le \cos^2 indique la qualité de représentation des variables : plus il est élevé, mieux la variable est représentée sur les trois axes considérés.

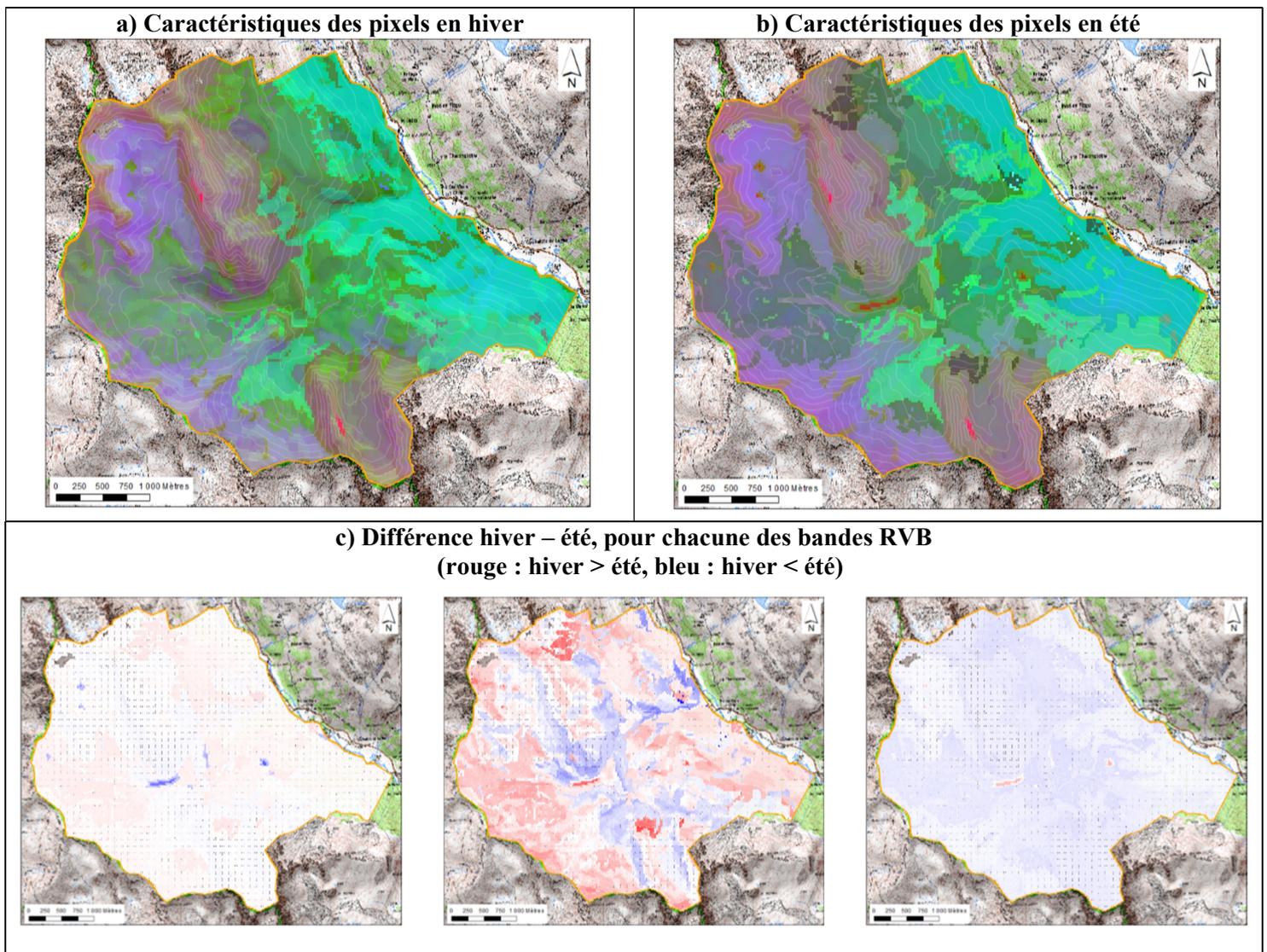


Annexe 7 Représentation cartographique des caractéristiques des pixels de l'unité pastorale, en éclatant la coloration pour chacune des saisons.

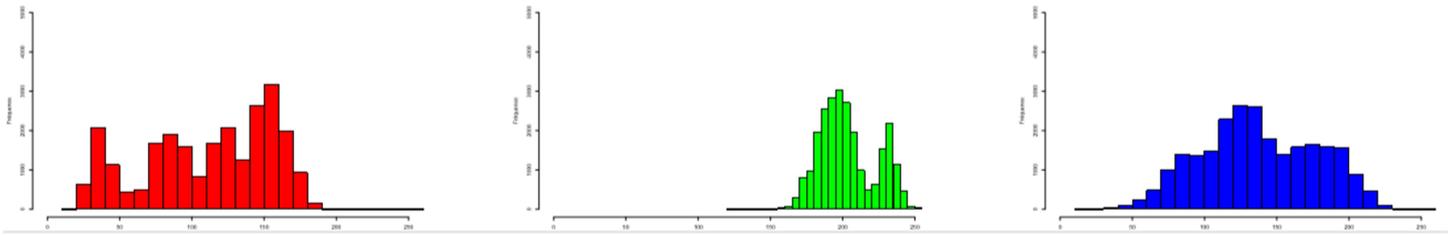
Une ACP est réalisée sur les quatorze sous-dimensions fonctionnelles permettant de caractériser les couples pixel-saison. Sur cette ACP, les trois premiers axes sont retenus, et les coordonnées des couples pixel-saison sur ces axes principaux sont codées en RVB (valeurs décomposées sur trois gradients de 0 à 255). Le codage RVB est réalisé séparément pour chaque saison, ce qui permet de limiter les différences de couleur inter-saison liées notamment au deuxième axe principal (contrairement à la Figure 8, où la même échelle RVB est utilisée pour l'hiver et l'été). La coloration est dite « standardisée » (cartes a et b).

Les différences de coordonnées « standardisées » des pixels entre saisons est représentée selon chaque bande R V et B sur la figure c, en lien avec la répartition des coordonnées « non standardisées » des pixels, en hiver (figure d) et en été (figure e), sur chacun des trois axes principaux.

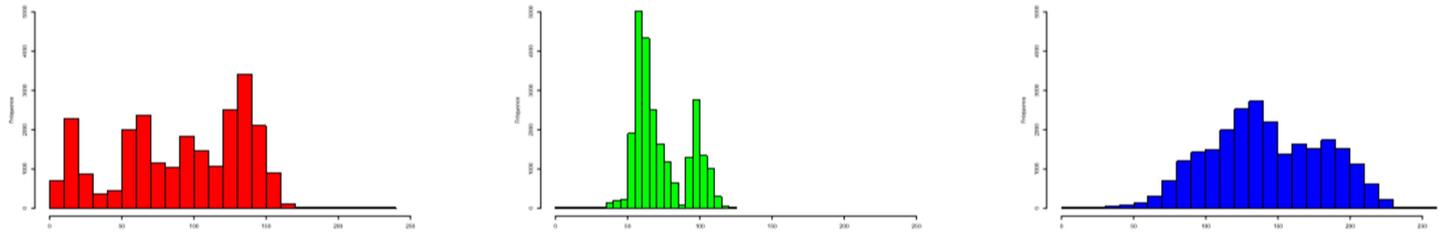
Le fond de carte est issu de l'IGN, et les lignes de niveau sont espacées de 50 m d'altitude.



d) Répartition des coordonnées des pixels en hiver sur les trois axes principaux de l'ACP fonctionnelle, coordonnées codées ensuite en RVB



e) Répartition des coordonnées des pixels en été sur les trois axes principaux de l'ACP fonctionnelle, coordonnées codées ensuite en RVB



Annexe 8 Indicateurs utilisés pour évaluer les modèles d'usage.

	Indicateur utilisé pour évaluer le modèle	Formule de calcul	Familles de modèles pour lesquelles l'indicateur est calculable
Qualité du modèle	R ² de Mc Fadden	$McFadden R2 = \frac{D_0 - D_M}{D_0}$	GLM
	R ² de Nagelkerke	$Nagel R2 = \frac{1 - e^{-\frac{D_M - D_0}{N_{obs}}}}{1 - e^{-\frac{D_0}{N_{obs}}}}$	GLM
	R ² de Cox-Snell	$CoxSnell R2 = 1 - e^{-\frac{D_M - D_0}{N_{obs}}}$	GLM
	avec D_0 la déviance du modèle nul, D_M la déviance du modèle étudié, et N_{obs} le nombre d'observations		
	Tjur	$Tjur = \overline{P_{observé 1}} - \overline{P_{observé 0}}$	GLM & RF
	avec $\overline{P_{observé 1}}$ la moyenne des probabilités prédites pour les cas où la présence d'usage est observée, $\overline{P_{observé 0}}$ la moyenne des probabilités prédites pour les cas où l'absence d'usage est observée		
	Test LR	Le test LR correspond à la <i>p-value</i> du test du <i>chi-2</i> appliqué aux déviances du modèle nul et du modèle étudié	GLM
	Gain relatif d'AIC par rapport au modèle nul	$gainAIC = \frac{AIC_0 - AIC_M}{AIC_0}$	GLM
avec AIC_0 l'AIC du modèle nul et AIC_M l'AIC du modèle étudié			
Capacité prédictive du modèle	AUC	L'AUC correspond à l'aire sous la courbe ROC, représentant la sensibilité en fonction de la spécificité : $sensibilité = f(1 - spécificité)$ $\leftrightarrow \frac{a}{a + c} = f\left(\frac{b}{d + b}\right)$ pour différents seuils de probabilité	GLM & RF
	Kappa de Cohen	$Kappa = \frac{2(ad - bc)}{(c + d)(a + c) + (a + b)(b + d)}$	GLM & RF
	TSS	$TSS = spécificité + sensibilité - 1$ $= \frac{d}{d + b} + \frac{a}{a + c} - 1$	GLM & RF

avec a, b, c, d les éléments de la matrice de confusion

	Observé 0	Observé 1
Prédit 0	d	c
Prédit 1	b	a

le seuil de probabilité pour affecter 0 ou 1 à la prédiction étant choisi de sorte que sensibilité et spécificité soient maximisées pour le *Kappa* et le *TSS*.

Annexe 9 Hypothèses concernant la présence / absence des usages, en fonction des caractéristiques fonctionnelles des pixels

Hypothèses concernant les probabilités de présence / absence des usages, hivernaux (deux colonnes de gauche) ou estivaux (deux colonnes de droite), en fonction des caractéristiques fonctionnelles des pixels résumées en 14 sous-dimensions. Les sens de variation supposés (probabilité de présence de l'usage en fonction des variables explicatives) sont affichés à droite des variables explicatives (croissance, décroissance, ou courbe en cloche). Les hypothèses pour les usages associés aux ongulés et galliformes sont largement inspirées des sources suivantes : ONCFS ; Conservatoire Rhône-Alpes des espaces naturels et al., 2010 ; Fédération Départementale des Chasseurs de l'Isère, ONCFS, 2014 ; Belleau et al., 2018.

Les pastilles colorées indiquent que l'hypothèse est validée (variable explicative qui ressort dans les modèles avec le sens de variation supposé : pastille verte avec un v), qu'elle est partiellement validée (variable explicative qui ressort dans les modèles avec le sens de variation supposé sur une partie du gradient seulement : pastille jaune), qu'elle est invalidée (variable explicative qui ressort dans les modèles avec un sens de variation opposé au sens supposé : pastille orange avec un x). L'absence de pastille signifie que la variable ne ressort pas dans les modèles, ou qu'elle ressort sans sens de variation clair et comparable aux hypothèses.

Usage considéré	Hypothèses concernant la probabilité de présence de l'usage	Usage considéré	Hypothèses concernant la probabilité de présence de l'usage
		Usage pastoral – caractéristiques estivales	Augmentation avec la quantité et la qualité de ressources alimentaires : le troupeau accède à davantage de biomasse en herbe, la ressource est appétente, mais peu importe son côté diversifié avec des insectes, des baies, etc. (cf dim5_axe1)
			Mat_Biomasse ✓
			Mat_Appetence ✓
			Augmentation avec la naturalité (le troupeau utilise des espaces naturels, les alpages) puis diminution (le berger doit pouvoir retourner à sa cabane relativement facilement)
			Naturalité ^
			Diminution avec la diminution de la quantité de sol : les zones rocheuses ou les éboulis sont plus instables et dangereux (risque pour les bêtes)
			Abio_Sol ✗
		Usage pastoral : couchades – caractéristiques estivales	Augmentation avec la quantité de ressources alimentaires : il faut encore davantage de biomasse que pour la pâture simple, car le troupeau stagne plus longtemps sur la zone. Peu importe l'appétence : les zones de couchades peuvent au contraire être des zones où le berger force le troupeau à consommer une végétation moins appétente, pour éviter qu'elle ne se développe trop
			Mat_Biomasse ✓
			Augmentation avec la naturalité (les zones de stagnation du troupeau peuvent être source de nuisance : bruit, odeur inconfortables pour certains résidents) puis diminution (le berger doit pouvoir retourner à sa

			cabane relativement facilement, cette contrainte serait potentiellement plus importante pour les couchades que pour les pâtures simples)
			Naturalité ^ (X)
			Diminution avec la diminution de la quantité de sol : les zones rocheuses ou les éboulis sont plus instables et dangereux (risque pour les bêtes). Les couchades étant des zones de stagnation, l'instabilité plus globale liée à la pente aurait davantage d'influence
			Abio_Sol / (●) Ctxt_Instab /
			Augmentation avec le caractère abrité, orienté « à la fraîche », pour que le troupeau ne subisse pas les fortes chaleurs lorsqu'il couche en journée
			Immat_Abri /
Usage récréatif saisonnier lié aux itinéraires – caractéristiques hivernales	Augmentation avec la qualité visuelle, l'esthétique du paysage	Usage récréatif saisonnier lié aux itinéraires – caractéristiques estivales	Augmentation avec la qualité visuelle, l'esthétique du paysage et l'esthétique plus locale (floraison)
	Ctxt_Vue / (X)		Ctxt_Vue / (X) Immat_Visuel / (●)
	Diminution avec l'instabilité liée aux avalanches, et diminution avec le temps d'accès (difficulté et temps de déplacement augmentés)		Diminution avec l'instabilité géomorphologique et le caractère rocheux/caillouteux, et diminution avec le temps d'accès (difficulté et temps de déplacement augmentés)
	Ctxt_Instab / Acces_Temps /		Ctxt_Instab / (●) Abio_Sol / (●) Acces_Temps /
Usage récréatif saisonnier révélé par les photographies Flickr – caractéristiques hivernales	Augmentation avec la qualité visuelle, l'esthétique du paysage	Usage récréatif saisonnier révélé par les photographies Flickr – caractéristiques estivales	Augmentation avec la qualité visuelle, l'esthétique du paysage et l'esthétique plus locale (floraison)
	Ctxt_Vue / (Y)		Ctxt_Vue / (Y) Immat_Visuel / (X)
	Diminution avec l'instabilité liée aux avalanches, et diminution avec le temps d'accès (difficulté et temps de déplacement augmentés)		Diminution avec l'instabilité géomorphologique et le caractère rocheux/caillouteux, et diminution avec le temps d'accès (difficulté et temps de déplacement augmentés)
	Ctxt_Instab / Acces_Temps /		Ctxt_Instab / Abio_Sol / Acces_Temps /
Domaine de vie	Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité	Domaine de vie	Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité

annuel du bouquetin – caractéristiques hivernales	Acces_Temps /	annuel du bouquetin – caractéristiques estivales	Acces_Temps /
	Naturalité /		Naturalité /
	Diminution avec la difficulté d'accès liée à l'enneigement (pertes énergétiques importantes pour les déplacements dans la neige)		Diminution avec l'absence de caches et d'abris, et augmentation avec la diminution de quantité de sol (le bouquetin préfère les falaises entrecoupées de vires – source : ONCFS)
	Acces_Neige /		Immat_Abri \
	Diminution avec l'instabilité liée aux avalanches, qui présentent un danger important		Abio_Sol /
	Ctxt_Instab \		Immat_StrVeg \
	Diminution avec la diminution d'énergie thermique disponible (zones moins rapidement déneigées)		Augmentation avec l'appétence de la végétation (la quantité importe moins que pour un troupeau de moutons, étant donné la densité de la population)
Abio_Therm \	Mat_Appetence /		
Présence de strates de végétation (abri et nourriture plus accessibles en hiver)			
Immat_StrVeg /			
Domaine de vie annuel du mouflon – caractéristiques hivernales	Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité	Domaine de vie annuel du mouflon – caractéristiques estivales	Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité
	Acces_Temps /		Acces_Temps /
	Naturalité /		Naturalité /
	Diminution avec la difficulté d'accès liée à l'enneigement (pertes énergétiques importantes pour les déplacements dans la neige)		Diminution avec l'absence de caches et d'abris (le mouflon préfère les zones fraîches et ombragées – source : ONCFS)
	Acces_Neige /		Immat_Abri \
	Diminution avec la diminution d'énergie thermique disponible (zones moins rapidement déneigées)		Augmentation avec l'appétence de la végétation (la quantité importe moins que pour un troupeau de moutons, étant donné la densité de la population)
	Abio_Therm \		Mat_Appetence /
Présence de strates de végétation (abri et nourriture plus accessibles en hiver)			
Immat_StrVeg /			
Domaine de vie annuel du cerf – caractéristiques hivernales	Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité	Domaine de vie annuel du cerf – caractéristiques estivales	Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité
	Acces_Temps /		
	Naturalité /		Acces_Temps /
Diminution avec la difficulté d'accès liée à l'enneigement (pertes			

	<p>énergétiques importantes pour les déplacements dans la neige)</p> <p>Acces_Neige /</p> <p>Diminution avec la diminution d'énergie thermique disponible (zones moins rapidement déneigées)</p> <p>Abio_Therm \</p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire et la lignosité (l'hiver le cerf se nourrit de rameaux de résineux), et la biomasse disponible</p> <p>Mat_Appetence / Mat_Biomasse /</p> <p>Présence de strates de végétation (abri et nourriture plus accessibles en hiver)</p> <p>Immat_StrVeg /</p>		<p>Naturalité / </p> <p>Augmentation avec l'appétence de la végétation, sa diversité (le cerf consomme des herbacées au sol mais aussi des feuilles de feuillus et de fougères, des sous-ligneux, des rameaux et des jeunes pousses d'arbres : potentiel effet de la mosaïque d'habitats), et sa quantité (consommation relativement plus importante que les autres ongulés étudiés – source : ONCFS)</p> <p>Mat_Appetence / Mat_DivAlim / Mat_Biomasse / Ctxt_Fonctio \</p>
Domaine de vie annuel du tétras – caractéristiques hivernales	<p>Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité</p> <p>Acces_Temps / Naturalité /</p> <p>Augmentation avec la stratification verticale de la végétation, qui fournit des caches et abris</p> <p>Immat_StrVeg /</p> <p>Augmentation puis diminution avec l'énergie thermique disponible (pour construire des tunnels et caches sous la neige, il faut suffisamment d'épaisseur de neige sans que ce soit des conditions extrêmes, trop froides)</p> <p>Abio_Therm ^</p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire (le tétras consomme des végétaux variés, selon la disponibilité)</p> <p>Mat_DivAlim /</p>	Domaine de vie annuel du tétras – caractéristiques estivales	<p>Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité</p> <p>Acces_Temps / Naturalité /</p> <p>Augmentation avec la stratification verticale de la végétation, qui fournit des caches et abris</p> <p>Immat_StrVeg /</p> <p>Diminution avec l'homogénéité locale en habitats (le tétras utilise des habitats en mosaïque)</p> <p>Ctxt_Fonctio \</p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire (le tétras consomme des baies et autre végétaux, en plus d'insectes pour les plus jeunes)</p> <p>Mat_DivAlim /</p>
Zone d'hivernage du tétras – caractéristiques hivernales	<p>Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité</p> <p>Acces_Temps / Naturalité /</p> <p>Augmentation avec la stratification verticale de la végétation, qui fournit des caches et abris</p> <p>Immat_StrVeg /</p> <p>Augmentation puis diminution avec l'énergie thermique disponible (pour</p>	Zone de nidification (été) du tétras – caractéristiques estivales	<p>Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité</p> <p>Acces_Temps / Naturalité /</p> <p>Augmentation avec la stratification verticale de la végétation, qui fournit des caches et abris</p> <p>Immat_StrVeg /</p> <p>Diminution avec l'homogénéité locale en habitats (le tétras utilise des</p>

	<p>construire des tunnels et caches sous la neige, il faut suffisamment d'épaisseur de neige sans que ce soit des conditions extrêmes, trop froides)</p> <p>Abio_Therm </p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire (le tétras consomme des végétaux variés, selon la disponibilité)</p> <p>Mat_DivAlim  </p>		<p>habitats en mosaïque)</p> <p>Ctxt_Fonctio </p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire (le tétras consomme des baies et autre végétaux, en plus d'insectes pour les plus jeunes : importance plus forte de cette variable pour la nidification que pour le domaine de présence)</p> <p>Mat_DivAlim </p>	
<p>Domaine de vie annuel de la perdrix bartavelle – caractéristiques hivernales</p>	<p>Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité</p> <p>Acces_Temps  </p> <p>Naturalité  </p> <p>Diminution avec la diminution d'énergie thermique disponible (zones moins rapidement déneigées)</p> <p>Abio_Therm </p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire (la bartavelle a un régime alimentaire diversifié)</p> <p>Mat_DivAlim </p>	<p>Domaine de vie annuel de la perdrix bartavelle – caractéristiques estivales</p>	<p>Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité</p> <p>Acces_Temps  </p> <p>Naturalité  </p> <p>Diminution avec l'homogénéité locale en habitats (la bartavelle préfère les milieux ouverts et accidentés : pelouses, landes et boisements clairs, entrecoupés de vires rocheuses)</p> <p>Ctxt_Fonctio </p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire (la bartavelle a un régime alimentaire diversifié)</p> <p>Mat_DivAlim  </p>	
			<p>Zone de nidification (été) de la perdrix bartavelle – caractéristiques estivales</p>	<p>Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité</p> <p>Acces_Temps  </p> <p>Naturalité  </p> <p>Diminution avec l'homogénéité locale en habitats (la bartavelle préfère les milieux ouverts et accidentés : pelouses, landes et boisements clairs, entrecoupés de vires rocheuses)</p> <p>Ctxt_Fonctio </p> <p>Augmentation avec la diversité alimentaire (la bartavelle a un régime alimentaire diversifié, d'autant plus pour les plus jeunes : importance plus forte de cette variable pour la nidification que pour le domaine de présence)</p> <p>Mat_DivAlim  </p> <p>Augmentation puis diminution avec la stratification verticale de la végétation (la nidification s'effectue à couvert, dans des sites à 2-4 strates, mais pas en zone forestière)</p> <p>Immat_StrVeg </p>

		<p style="text-align: center;">Zone de nidification (été) du lagopède – caractéristiques estivales</p>	Augmentation avec la tranquillité, liée au temps d'accès et à la naturalité
			Acces_Temps / ● Naturalité /
			Diminution avec l'homogénéité locale en habitats (le lagopède préfère les milieux en mosaïque : landes à éricacées avec des arbres épars, végétation rase comme de la toundra, éléments minéraux sources d'abris)
			Ctxt_Fonctio \
			Diminution avec l'absence de caches et d'abris (éléments minéraux sources d'abris, et préférence pour la fraîcheur liée à la topographie), et augmentation avec la diminution d'énergie thermique disponible (versants plus frais)
			Immat_Abri \ Abio_Therm / v
			Augmentation avec la diversité alimentaire (pour l'élevage des jeunes une fois les œufs éclos)
			Mat_DivAlim /
Diminution avec la stratification verticale de la végétation (la nidification s'effectue en strate rase parsemée de rochers, même si l'élevage des jeunes ensuite s'effectue en milieux diversifiés)			
Immat_StrVeg \ x			

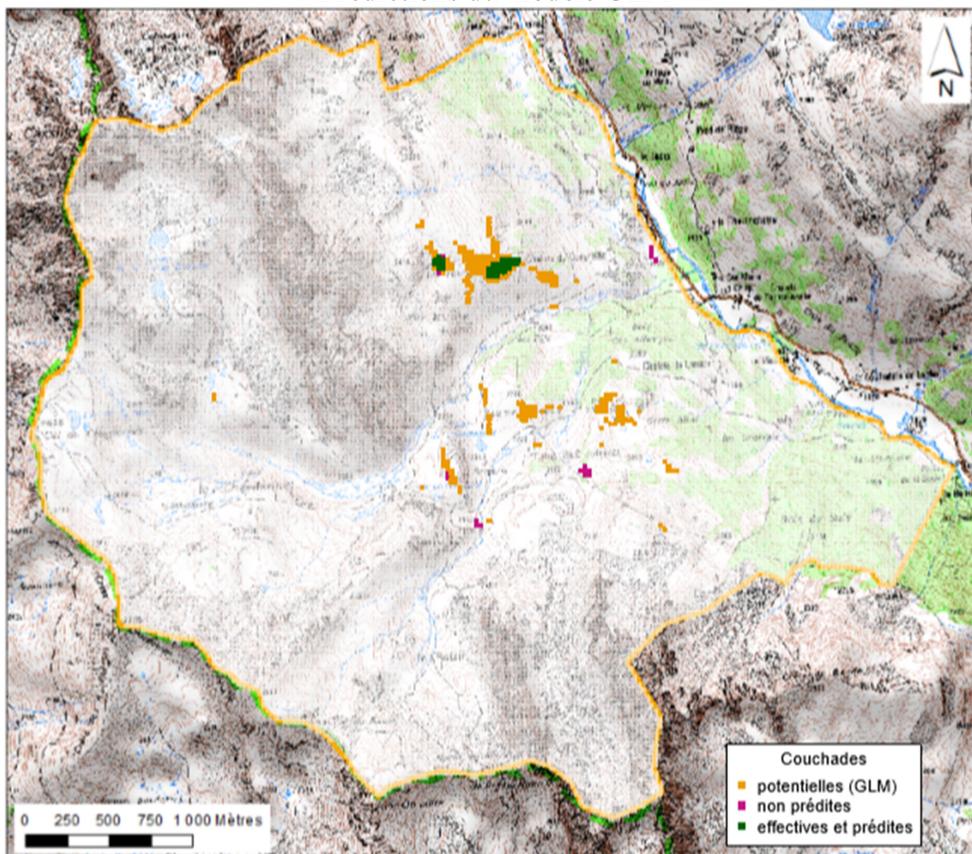
Annexe 10 Evaluation des modèles de présence / absence des usages

Modèles GLM	LRtest	R2_McFad	R2_Nagel	R2_CoxSnell	R2_Tjur	SignifVSmod elenul	gainAICVSm odelenul	TSS	kappa	auc
bouquetin_ete	0,000	0,477	0,621	0,429	0,510	0,000	0,475	0,698	0,622	0,924
bouquetin_hiver	0,000	0,435	0,578	0,400	0,466	0,000	0,432	0,650	0,566	0,912
cerf_ete	0,000	0,647	0,790	0,592	0,691	0,000	0,645	0,774	0,774	0,963
cerf_hiver	0,000	0,650	0,792	0,594	0,693	0,000	0,648	0,780	0,780	0,963
contemplatif_FlickR_ete	0,000	0,150	0,153	0,007	0,025	0,000	0,122	0,423	0,017	0,737
contemplatif_FlickR_hiver	0,001	0,207	0,208	0,002	0,034	0,001	0,122	0,331	0,016	0,654
lagopede_alpin_nidif_ete	0,000	0,588	0,693	0,412	0,586	0,000	0,586	0,777	0,684	0,959
mouflon_ete	0,000	0,575	0,732	0,548	0,621	0,000	0,573	0,716	0,716	0,946
mouflon_hiver	0,000	0,564	0,723	0,541	0,605	0,000	0,562	0,704	0,701	0,941
pasto_couchades_ete	0,000	0,517	0,521	0,016	0,243	0,000	0,445	0,720	0,172	0,865
pasto_ete	0,000	0,411	0,575	0,426	0,479	0,000	0,409	0,647	0,647	0,895
perdrix_bartavelle_nidif_ete	0,000	0,404	0,433	0,091	0,221	0,000	0,394	0,760	0,184	0,937
perdrix_bartavelle_presence_ete	0,000	0,837	0,901	0,594	0,845	0,000	0,834	0,904	0,854	0,993
perdrix_bartavelle_presence_hiver	0,000	0,812	0,884	0,584	0,828	0,000	0,810	0,905	0,858	0,991
recreatif_ete	0,000	0,145	0,168	0,050	0,064	0,000	0,140	0,453	0,117	0,796
recreatif_hiver	0,000	0,061	0,085	0,045	0,046	0,000	0,058	0,259	0,111	0,678
tetras_lyre_hivernage_hiver	0,000	0,474	0,559	0,276	0,403	0,000	0,470	0,750	0,473	0,940
tetras_lyre_nidif_ete	0,000	0,759	0,827	0,456	0,754	0,000	0,755	0,895	0,788	0,985
tetras_lyre_presence_ete	0,000	0,904	0,950	0,694	0,918	0,000	0,902	0,950	0,941	0,997
tetras_lyre_presence_hiver	0,000	0,926	0,963	0,703	0,937	0,000	0,924	0,961	0,955	0,998

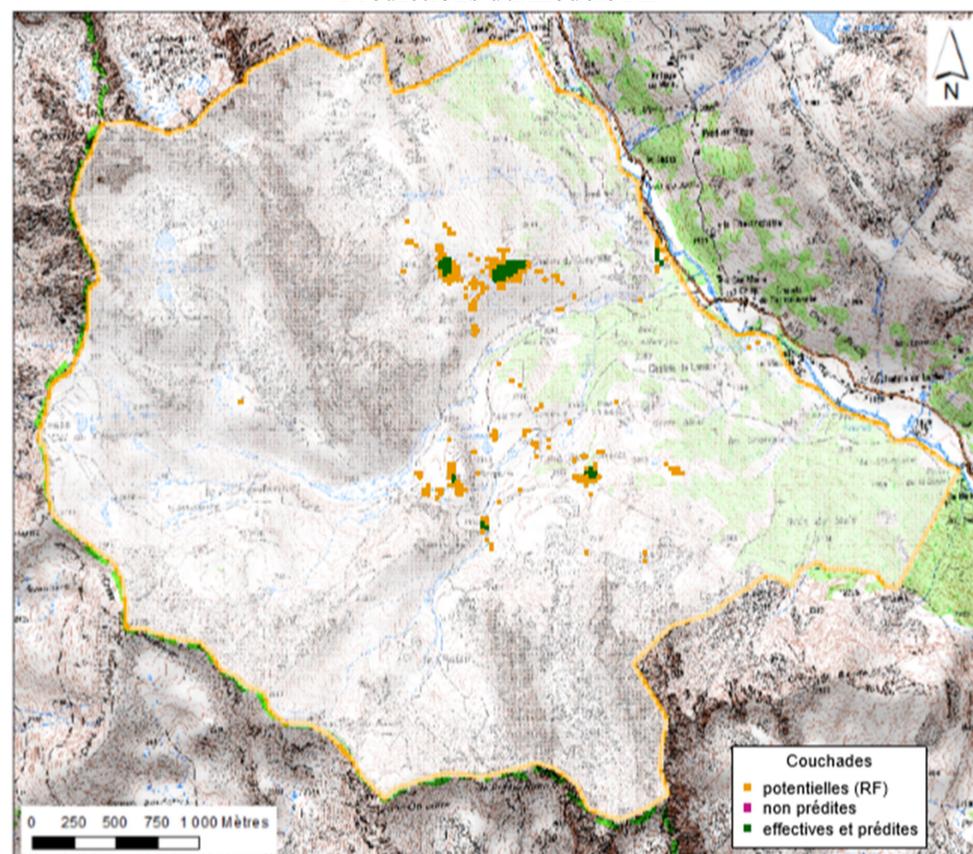
Modèles RF	LRtest	R2_McFad	R2_Nagel	R2_CoxSnell	R2_Tjur	SignifVSmod elenul	gainAICVSm odelenul	TSS	kappa	auc
bouquetin_ete	-	-	-	-	0,930	-	-	0,964	0,952	0,998
bouquetin_hiver	-	-	-	-	0,923	-	-	0,962	0,950	0,998
cerf_ete	-	-	-	-	0,959	-	-	0,974	0,974	0,999
cerf_hiver	-	-	-	-	0,950	-	-	0,972	0,972	0,999
contemplatif_FlickR_ete	-	-	-	-	0,617	-	-	0,413	0,031	0,714
contemplatif_FlickR_hiver	-	-	-	-	0,610	-	-	0,294	0,026	0,634
lagopede_alpin_nidif_ete	-	-	-	-	0,924	-	-	0,955	0,922	0,997
mouflon_ete	-	-	-	-	0,961	-	-	0,979	0,979	0,999
mouflon_hiver	-	-	-	-	0,954	-	-	0,978	0,978	0,999
pasto_couchades_ete	-	-	-	-	0,730	-	-	0,981	0,369	0,993
pasto_ete	-	-	-	-	0,932	-	-	0,954	0,952	0,998
perdrix_bartavelle_nidif_ete	-	-	-	-	0,809	-	-	0,961	0,644	0,997
perdrix_bartavelle_presence_ete	-	-	-	-	0,961	-	-	0,970	0,956	0,999
perdrix_bartavelle_presence_hiver	-	-	-	-	0,953	-	-	0,968	0,954	0,999
recreatif_ete	-	-	-	-	0,686	-	-	0,820	0,397	0,961
recreatif_hiver	-	-	-	-	0,713	-	-	0,727	0,497	0,931
tetras_lyre_hivernage_hiver	-	-	-	-	0,876	-	-	0,930	0,806	0,993
tetras_lyre_nidif_ete	-	-	-	-	0,937	-	-	0,963	0,916	0,998
tetras_lyre_presence_ete	-	-	-	-	0,984	-	-	0,987	0,985	1,000
tetras_lyre_presence_hiver	-	-	-	-	0,980	-	-	0,985	0,983	1,000

Annexe 11 Localisation des couchades prédites à partir des modèles GLM et RF, par rapport aux couchades effectives

Prédictions du modèle GLM



Prédictions du modèle RF

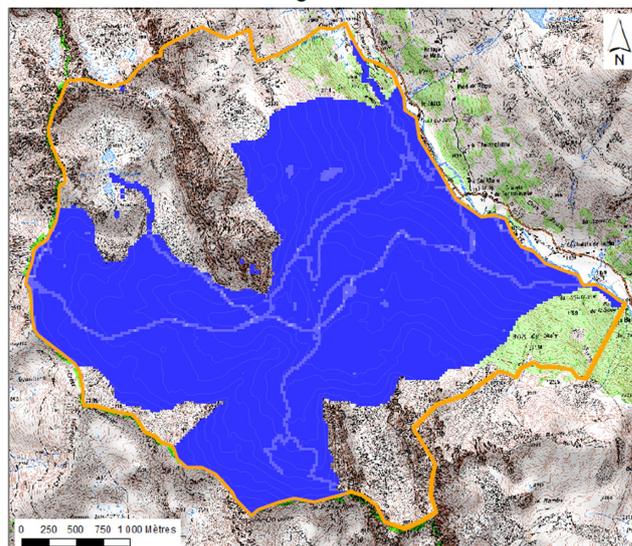
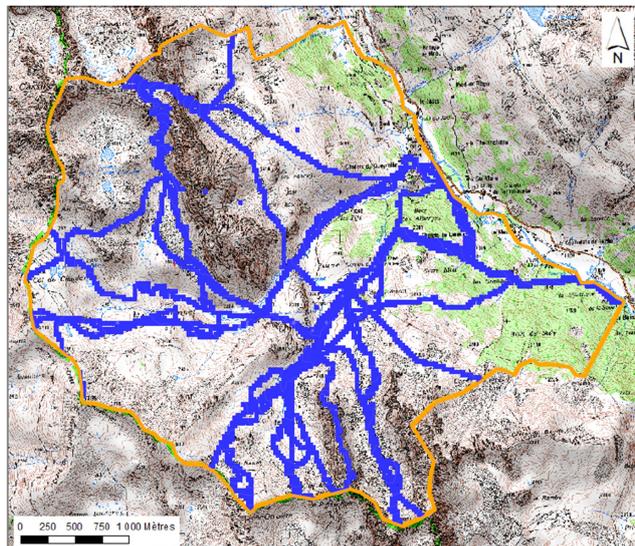


Annexe 12 Degré des nœuds « pixels » dans les réseaux bipartis pixels-usages, selon si seulement les usages humains ou seulement les usages animaux sont considérés

Hiver

Eté

Réseau d'usages humains



Réseau d'usages animaux

