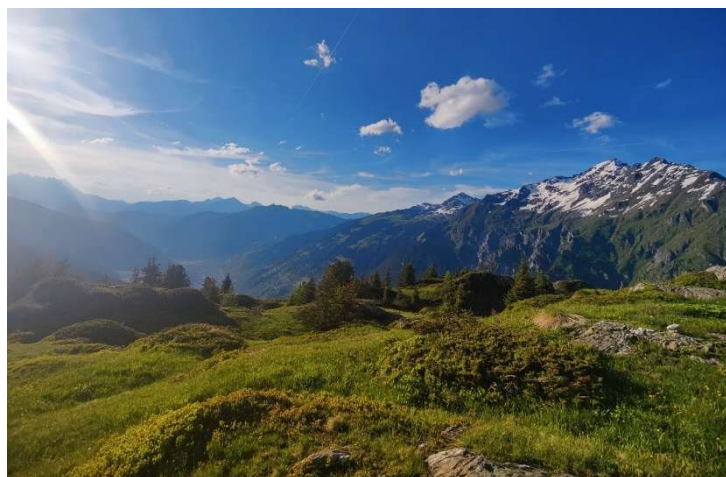


Impact du changement climatique sur l'utilisation des terres agricoles dans les Alpes suisses : une étude comparative dans l'Entremont (VS) et en Gruyère (FR)

Fiora Marine

Sous la direction des Prof. Emmanuel Reynard et Christophe Randin
Septembre 2025



Val de Bagnes depuis la cabane Brunet, © Marine Fiora, 2024

« Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. À ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable. »

Je déclare sur l'honneur avoir déposé la version finale de mon manuscrit.

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes codirecteurs.

À Emmanuel Reynard, pour le suivi attentif de ce mémoire et, plus largement, pour ses enseignements précieux.

À Christophe Randin, pour sa patience, sa disponibilité et ses réponses éclairantes à mes nombreuses questions d'ordre technique.

Je remercie également Bruno Clément pour son expertise et la qualité de ses retours.

Ma reconnaissance s'adresse aussi à l'ensemble des agriculteurs interviewés, qui m'ont accordé de leur temps et dont les échanges passionnés et stimulants ont nourri ma réflexion.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenue au cours de cette année, en particulier ma famille, m'apportant confiance, encouragement et détermination dans la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	I
GLOSSAIRE.....	II
1. INTRODUCTION	1
1.1 CONTEXTE.....	1
1.2 PROBLEMATIQUE.....	4
1.3 QUESTIONS DE RECHERCHE ET HYPOTHESES.....	4
1.4 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	5
1.5 STRUCTURE DE LA RECHERCHE	6
2. ÉTAT DE L'ART	7
2.1 AGRICULTURE EN SUISSE	7
2.1.1 <i>Les zones de montagne en Suisse</i>	7
2.1.2 <i>Les piliers de l'agriculture en Suisse</i>	8
2.2 CADRE LEGAL ET POLITIQUES PUBLIQUES A INCIDENCE SPATIALE EN LIEN AVEC L'AGRICULTURE DE MONTAGNE.....	11
2.2.1 <i>Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT)</i>	11
2.2.2 <i>Loi fédérale sur les forêts (LFo)</i>	12
2.2.3 <i>Catégories des parcelles agricoles</i>	12
2.3 LE CLIMAT EN SUISSE.....	13
2.3.1 <i>Le changement climatique en Suisse</i>	15
2.3.2 <i>Impact du changement climatique sur la végétation de montagne</i>	17
2.4 AGRICULTURE SUISSE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE	18
2.4.1 <i>Appréhender les niches climatiques</i>	20
2.4.2 <i>Visualiser les niches : modèles de distributions des espèces</i>	21
2.5 MANQUEMENTS DANS LA LITTÉRATURE.....	22
3. METHODOLOGIE, ZONES D'ETUDE ET DONNEES.....	24
3.1 APPROCHES UTILISEES POUR LA RECHERCHE	24
3.2 ZONES D'ETUDE	24
3.3 TYPE DE DONNEES.....	31
3.3.1 <i>Les types de gestion agricole</i>	31
3.3.2 <i>Les données climatiques</i>	34
3.3.3 <i>Les données sur les exploitations</i>	35
3.4 OUTILS UTILISES	37
3.4.1 <i>Analyse descriptive</i>	37
3.4.2 <i>Modélisation</i>	39
3.4.3 <i>Entretiens semi-directifs</i>	42
4. RESULTATS	44
4.1 ANALYSE STATISTIQUE	44

4.1.1	Analyse en composantes principales.....	44
4.1.2	Échelle multidimensionnelle non métrique.....	56
4.1.3	Analyse KMO.....	56
4.1.4	Indice de résilience des codes cultures.....	58
4.2	MODELISATION DES CONDITIONS FAVORABLES DES <i>CODES CULTURES</i>	60
4.2.1	Le blé.....	60
4.2.2	Les prairies permanentes.....	65
4.2.3	Les pâturages extensifs.....	69
4.2.4	Les pâturages d'estivage.....	73
4.3	PERCEPTION DES AGRICULTEURS.....	77
4.3.1	Impact du changement climatique.....	77
4.3.2	Adaptation des pratiques agricoles.....	81
5.	DISCUSSION	98
5.1	LA DISTRIBUTION DES <i>CODES CULTURES</i> SUR LE TERRITOIRE.....	99
5.2	IMPORTANCE DU CROISEMENT DES ANALYSES.....	100
5.3	EVOLUTION DES CONDITIONS FAVORABLES DES <i>CODES CULTURES</i>	102
5.3.1	Extension de la surface au sein de la SAU : changement de code culture.....	103
5.3.2	Extension de la surface hors de la SAU.....	106
5.4	IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES PRATIQUES AGRICOLES ET ADAPTATIONS.....	107
5.4.1	Ambivalence de la pousse herbagère.....	107
5.4.2	Nécessité accrue d'irrigation.....	109
5.4.3	La modification des environnements.....	110
5.5	LIMITES.....	111
5.6	RECOMMANDATIONS.....	112
5.6.1	Analyse ciblée des régions dont les surfaces favorables restent stables.....	112
5.6.2	Analyse ciblée des stocks d'eau et de son utilisation mesurée.....	112
6.	CONCLUSION	113
	RÉFÉRENCES.....	115
	ANNEXES	127

RÉSUMÉ

Ce travail propose une étude comparative de l'impact du changement climatique sur l'utilisation des terres agricoles dans deux régions alpines helvétiques contrastées : l'Entremont (VS) et la Gruyère (FR). L'objectif est d'évaluer la résilience et le potentiel d'adaptation des systèmes agricoles locaux face aux mutations environnementales, mais aussi de comprendre comment les cadres législatifs, les politiques publiques et les dynamiques socio-économiques influencent ces trajectoires. Pour cela, la recherche s'appuie sur une méthodologie combinant une analyse spatiale et statistique des types de *codes cultures* agricoles, des modélisations prospectives des niches climatiques pour différents types de cultures et de prairies, en mobilisant les scénarii climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5, et des entretiens semi-directifs avec des agriculteurs afin de saisir leurs perceptions, leurs stratégies d'adaptation et les freins rencontrés sur le terrain.

L'étude cherche à établir un lien entre la diversité des pratiques agricoles, la multifonctionnalité des terres agricoles et leur capacité de résilience face aux changements environnementaux. Les résultats statistiques révèlent d'importantes différences entre les deux régions étudiées, ainsi qu'entre les types de cultures. Ils montrent notamment que plus une culture dépend de conditions environnementales spécifiques et limitées, plus elle est vulnérable aux perturbations, comme c'est le cas des monocultures ou des prairies permanentes.

Par ailleurs, les projections climatiques issues des modèles de distribution des espèces (SDM, *Species Distribution Modeling*) indiquent une diminution des zones favorables aux prairies permanentes, tandis qu'elles montrent une amélioration des conditions pour certaines cultures actuellement peu présentes en altitude, comme le blé, le maïs ou le seigle. Cela suggère que si certaines *codes cultures* considérés comme intensifs voient leur implantation menacée, d'autres pourraient au contraire trouver de nouvelles opportunités dans des zones jusqu'ici inadaptées. Les modèles mettent également en évidence l'existence de terrains aujourd'hui peu ou non productifs ou boisés qui pourraient devenir propices à l'agriculture à l'avenir. Enfin, la recherche qualitative menée auprès des agriculteurs a permis de souligner les limites à l'évolution des pratiques agricoles, en particulier dans les régions de montagne, où les contraintes environnementales, législatives et économiques freinent fortement les possibilités d'adaptation.

En comparant les dynamiques agricoles de l'Entremont et de la Gruyère, ce travail met en lumière les contrastes régionaux en matière de vulnérabilité, d'adaptation et de transition face aux changements environnementaux. Il propose des analyses spatiales concrètes et identifie des leviers d'action à destination des décideurs publics, des agriculteurs et des chercheurs.

Mots-clefs : agriculture de montagne, changement climatique, adaptation, résilience, Suisse, multifonctionnalité

GLOSSAIRE

ARE :	Office fédéral du développement territorial
Code culture :	Nom des catégories suisses de l'utilisation des parcelles agricoles
IPCC/GIEC :	Intergovernmental Panel on Climate Change / Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
LAgr :	Loi fédérale sur l'agriculture
LAT :	Loi fédérale sur l'aménagement du territoire
LPN :	Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage
OFAG :	Office fédéral de l'agriculture
OFEV :	Office fédéral de l'environnement
OPD :	Ordonnance sur les paiements directs
PER :	Prestations écologiques requises
NCSS :	National Centre for Climate Services

1. INTRODUCTION

Étudier la géographie physique et humaine dans les montagnes suisses, c'est se confronter à un imaginaire puissant, hériter de siècles d'histoire, de récits et de représentations collectives. Qui n'a d'ailleurs jamais associé la Suisse à ses cimes majestueuses, ses alpages verdoyants et ses traditions alpestres immuables ? Ces représentations, profondément ancrées dans les esprits, nourrissent un attachement profond à un paysage considéré comme fixe, préservé, presque intemporel. Mais derrière cette photo figée de carte postale se cachent des réalités bien plus complexes, faites de la nécessité de développements et d'adaptations rapides dans le contexte des changements globaux et en particulier du changement climatique. L'impact de ces modifications climatiques touche de nombreuses sphères de la société, en particulier l'agriculture de montagne qui dépend fortement des conditions environnementales et topographiques (FAO, 2019). La modification de la disponibilité de l'accès à l'eau liée à la fonte des neiges, la fréquence accrue des sécheresses estivales, l'augmentation des extrêmes climatiques limitent la productivité et la résilience des systèmes agricoles de montagne (Agroscope, s.d.). Il apparaît donc pertinent de développer des outils d'analyse permettant d'évaluer non seulement s'il y a une nécessité d'adaptation du monde agricole de montagne au changement climatique, mais aussi dans quelles mesures ces adaptations peuvent être mises en place. De tels outils pourraient être mobilisés pour analyser la résilience et les capacités d'adaptation des agriculteurs, tout en fournissant des pistes d'évolution et des recommandations concrètes. Toutefois, ces potentielles adaptations doivent s'articuler avec des cadres politiques, économiques et sociaux déjà bien établis, pouvant influencer, voire conditionner, la marge de manœuvre du secteur agricole.

1.1 CONTEXTE

La montagne suisse occupe une place centrale dans l'imaginaire national, incarnant à la fois tradition, identité et résilience (Ziehli, 2019). Cette représentation prend racine dans le mythe de création de la Suisse : l'union des trois paysans issus de la Suisse primitive qui ont conclu le traité de la Confédération sur la prairie du Grütli. Ce récit pose les fondements historiques de la nation en plaçant le symbole de l'unité, de la liberté et de la résistance en son centre. Avec le temps, la figure du paysan montagnard est devenue l'archétype du « bon Suisse », porteur de valeurs de travail, de solidarité et de respect de la nature (Ziehli, 2019).

Ce récit fut renforcé dès le XIX^e siècle par des figures comme le Guillaume Tell de Schiller (1804), et porté par des mises en scène nationales et internationales, à l'image des expositions universelles¹ où le « village suisse » s'affichait comme vitrine d'une Suisse paysanne, rustique, enracinée et laborieuse (Centlivres, 2002; Steiner, 2020) en réaction aux bouleversements industriels voisins. Ainsi, la Suisse n'a eu de cesse de mettre en avant non seulement sa ruralité, l'importance de son secteur agricole, mais aussi cette image d'un pays enraciné dans ses montagnes, peuplé de vaches paisibles broutant une herbe grasse et fraîche, produisant

¹ Notamment l'exposition nationale suisse de Genève en 1896 (Centlivres, 2002; Steiner, 2020) puis à l'exposition universelle de Paris en 1900 (Dictionnaire Historique de la Suisse, 2013)

des fromages devenus emblématiques. Cette construction symbolique s'est progressivement adaptée : aujourd'hui, l'agriculture de montagne est également promue comme garante de la beauté des paysages et de l'image idyllique de la Suisse, un argument repris tant dans la communication institutionnelle que dans la publicité comme celle de l'Union Suisse des Paysans (Ziehli, 2019).

Cette vision idéalisée ne s'est pas limitée à l'imaginaire. Elle a largement influencé les politiques publiques, qui reconnaissent l'importance de l'agriculture de montagne non seulement pour la production alimentaire, mais aussi pour l'entretien des paysages, la biodiversité et la cohésion sociale des territoires (Rudaz & Debarbieux, 2013). De plus, la vitalité du débat public autour de l'agriculture, illustrée ne serait-ce que par de nombreuses initiatives populaires récentes², témoigne de l'attachement profond de la société suisse à son modèle agricole de montagne ainsi que de l'importance de ce secteur.

Jusqu'au début des années 1990, la politique agricole suisse était largement protectionniste, reposant sur des prix garantis, des quotas et des barrières douanières. Ce n'est qu'après les accords du GATT (dit *Uruguay Round*) de 1994 que le système a évolué vers les paiements directs, devenus aujourd'hui le principal levier de soutien au secteur agricole (Baumann & Moser, 2012; OCDE, 2024; OFAG, 2024c). Ces paiements directs, véritables fils directeurs de l'agriculture suisse contemporaine, conditionnent fortement les pratiques agricoles. En effet, près de 48% des revenus bruts des agriculteurs suisses proviennent de subventions directes, contre 18% en moyenne dans l'OCDE (OCDE, 2024). Ceci est notamment marqué dans les zones de montagne, où les paiements directs représentent une part essentielle du revenu des exploitants afin de compenser la difficulté d'entretien des régions escarpées et de soutenir la vitalité économique de ces exploitations moins rentables que celles de plaine.

Ainsi, l'agriculture suisse opère sous un régime juridique particulièrement rigoureux, marqué par plusieurs lois fédérales sectorielles et des ordonnances qui régulent l'usage du territoire. C'est notamment le cas de la loi sur l'aménagement du territoire (LAT³), dont l'un des principes est de conserver les terres agricoles et de maîtriser l'expansion urbaine ou encore de la loi sur la forêt (LFO⁴), qui assure la préservation des zones forestières et contrôle leur développement. S'ajoute aussi à cela la politique pour les espaces ruraux et les régions de montagne (PERM) qui soutient les régions de montagne vers un développement durable (Secrétariat d'État à l'économie SECO, 2022). Ainsi, les terres agricoles alpines sont strictement définies et conditionnées. Elles reposent sur une mosaïque de types de gestion des parcelles agricoles, désignés par des *codes cultures* qui catégorisent les différents types de cultures et de gestion des terres agricoles. Ces *codes cultures* ne désignent pas seulement les espèces cultivées, mais surtout les modes de gestion : prairies intensives ou extensives, pâturages d'alpage, pâturages boisés, cultures de maïs ou autres céréales, etc. Cette diversité de gestions, adaptée aux contraintes du relief, du climat et des traditions, structure le paysage

² Initiative pour la souveraineté alimentaire (23.09.2024), Initiative pour une alimentation sûre (23.09.2024), Initiative pour des aliments équitables (23.09.2018), Initiative pour la sécurité alimentaire (24.09.2017)

³ Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT) du 22 juin 1979 (RS 700)

⁴ Loi fédérale sur les forêts (LFO) du 4 octobre 1991 (RS 921.0)

rural suisse et influe sur les multiples fonctions que peuvent remplir les espaces agricoles : production alimentaire, entretien des milieux ouverts, maintien de la biodiversité et valorisation des services écosystémiques. Bien que ces lois et catégorisations favorisent la protection des paysages et l'utilisation durable des ressources, elles engendrent aussi d'importantes obligations administratives et techniques pour les agriculteurs ([Rudaz & Debarbieux, 2013](#)).

Pourtant, derrière cette image de stabilité et de tradition, la montagne suisse est aujourd'hui le siège de transformations profondes sous la contrainte des composantes des changements globaux, à savoir la conversion et la dégradation des sols (par l'intensification agricole, l'urbanisation, la déprise ou l'abandon des terres), la surexploitation des ressources naturelles (eau, forêts, biodiversité), les pollutions (eaux, sols, atmosphère), l'introduction d'espèces exotiques envahissantes et enfin les changements climatiques ([Millennium Ecosystem Assessment, 2005](#); [Confédération Suisse, 2022](#)).

Historiquement, c'est le facteur de transformation des usages du sol qui a le plus marqué les paysages et les pratiques agricoles suisses, mais le facteur climatique tend à prendre de plus en plus d'importance ([OFAG, 2019](#)). Les Alpes voient en effet leurs températures augmenter plus rapidement que dans la plupart des autres régions d'Europe ([Rebetez & Reinhard, 2008](#); [Pepin et al., 2022](#)), ce qui modifie en profondeur les régimes écologiques : la durée de la saison de végétation se trouve allongée, tandis que la fréquence et l'intensité des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, sécheresses et gelées tardives, s'accroissent ([CH2018, 2018](#)). Ces événements affectent directement les systèmes biologiques, notamment via des modifications de la phénologie des plantes et des cultures ([Vitasse et al., 2019](#)), réduisant la résilience de certains agrosystèmes. Ces bouleversements climatiques se traduisent concrètement par des conséquences géomorphologiques et biologiques : accroissement du risque d'érosion, perturbations dans la dynamique des cultures et des fourrages, et pression croissante sur les ressources naturelles ([OFAG, 2024c](#)).

Face à l'accélération du changement climatique ainsi qu'à ses différents impacts, les agriculteurs de montagne sont confrontés à la nécessité d'ajuster leurs pratiques. Cependant, la capacité d'adaptation se heurte souvent à la rigidité des cadres institutionnels et législatifs, qui, tout en se voulant protecteurs du territoire et des paysages, limitent la flexibilité nécessaire pour répondre aux nouveaux défis imposés par la nature ([Rudaz & Debarbieux, 2013](#)).

La Suisse s'est d'ailleurs engagée dans de nombreux projets pilotes d'adaptation, portés par la Confédération, les cantons ou des instituts fédéraux de recherche ([Conseil Fédéral, 2015](#); [OFEV, 2017](#); [OFEV, 2023](#)). Ces initiatives testent des stratégies innovantes telles que la diversification des modes de gestion, l'adaptation des pratiques fourragères, la gestion intégrée de l'eau, les infrastructures d'irrigation, etc. Si la littérature suisse sur l'adaptation agricole est riche et dynamique, elle souffre néanmoins d'un manque d'analyses spatialisées à l'échelle locale, capables de relier les différents types de gestion des parcelles agricoles (prairies intensives, pâturages extensifs, alpages, cultures de maïs, etc.) à leurs préférences environnementales, en particulier le climat. Or, la diversité et la résilience de l'agriculture de

montagne reposent sur différents modes de gestion, chacun adapté à des conditions écologiques spécifiques et structurant la multifonctionnalité des territoires alpins.

1.2 PROBLÉMATIQUE

Bien qu'elles représentent une portion restreinte de la production alimentaire nationale ([Union suisse des paysans, 2025](#)) en raison des conditions peu favorables aux grandes cultures, les pratiques agricoles de montagne sont essentielles dans le circuit de qualité à haute valeur ajoutée. Ceci inclut la production de fourrages pour l'alimentation des animaux et la fabrication de fromages AOP tels que le Gruyère AOP, le Vacherin Fribourgeois AOP et le Raclette du Valais AOP.

Ces pratiques, en plus de leur rôle productif, assurent une diversité de fonctions. Elles participent à la gestion des paysages ouverts en limitant l'enfrichement, contribuent à la préservation de la biodiversité, et soutiennent l'économie locale et touristique (via l'entretien des alpages, le commerce direct ou le tourisme rural) ([Rudaz & Debarbieux, 2013](#)). Cette diversité de pratiques illustre l'ajustement des agriculteurs à un environnement complexe et aux multiples fonctions. Actuellement, cette organisation territoriale et fonctionnelle est mise à l'épreuve par l'intensification du changement climatique, qui nécessite une réévaluation des équilibres existants et des capacités adaptatives du secteur.

Ces changements climatiques (sécheresses, précipitations extrêmes, modifications des saisons de croissance, stress hydrique) mettent en péril la résilience et la diversité fonctionnelle des systèmes agricoles en montagne. Cette faiblesse est amplifiée par une dépendance aux aides gouvernementales et la rigidité des structures institutionnelles et législatives suisses, qui imposent un cadre fixe à un environnement en perpétuel changement. La tension entre la nécessité d'adaptation et la stabilité réglementaire limite la capacité des agriculteurs à ajuster leurs pratiques. Certains espaces sont abandonnés, d'autres surexploités, et l'équilibre territorial s'en trouve fragilisé.

Dès lors, une question centrale émerge : dans quelle mesure les modes de gestion agricoles en montagne suisse, structurés par les facteurs topographiques et climatiques, pourront-ils évoluer et s'adapter face au changement climatique au XXI^e siècle ?

1.3 QUESTIONS DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES

Question 1 : Comment les différents *codes cultures* agricoles se répartissent-ils dans l'espace et selon quels gradients topographiques et climatiques dans les régions alpines ?

H1 : Les deux régions d'études connaissent des conditions différentes au niveau de la répartition des *codes cultures*.

Question 2 : Comment la répartition des *codes cultures* pourrait-elle évoluer sous l'effet du changement climatique ?

H2 : Les différents scénarii d'émission climatique affecteront la répartition des *codes cultures* de manière différenciée, le scénario RCP8.5 induisant les plus fortes modifications, avec des contrastes régionaux marqués et des réponses variables selon

les types de cultures, certaines voyant leur aire potentielle s'étendre tandis que d'autres subissant une contraction.

Question 3 : Quels sont les impacts concrets du changement climatique sur les pratiques agricoles et la gestion des parcelles, et quelles stratégies d'adaptation sont mises en place ou envisagées par les agriculteurs ?

H3 : Les exploitations agricoles mixtes en montagne présentent une capacité d'adaptation au changement climatique significativement supérieure aux exploitations spécialisées, en raison de leur diversification des pratiques.

Question 4 : Dans quelle mesure le croisement entre analyses spatiales/statistiques et retours d'expérience des agriculteurs permet-il d'identifier des clefs d'adaptation robustes et transférables pour l'agriculture de montagne ?

H4 : L'approche intégrée, combinant données quantitatives et qualitatives, permet de mieux comprendre les dynamiques d'adaptation, de révéler des leviers d'action concrets et de formuler des recommandations adaptées à la diversité des situations locales.

1.4 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Cette recherche poursuit plusieurs buts principaux :

- Caractériser la répartition dans les espaces géographiques et climatiques des différents modes de gestion agricoles en montagne. Le but est d'identifier les facteurs topographiques et climatiques qui expliquent et structurent la répartition dans l'espace des différents *codes cultures*. Certaines spécificités régionales pourront ainsi être mises en évidence. Cet axe s'appuie sur une approche quantitative, mobilisant l'analyse spatiale et statistique de données de gestion agricole et de variables environnementales.
- Prédire la distribution potentielle des différents types de gestions agricoles dans le futur sous deux scénarii d'émission de gaz à effet de serre et au cours du 21^e siècle.
- Appuyer l'analyse qualitative sur les résultats quantitatifs : les deux premiers objectifs servent de base à une analyse qualitative lors d'entretiens, en fournissant des supports visuels afin de recueillir les réactions, les perceptions et d'interroger la faisabilité des adaptations envisagées. Cette conjugaison enrichit l'analyse qualitative, confronte projections et expériences de terrain, identifie les modifications réalisées ou prévues, et permet de suggérer des recommandations d'adaptation contextualisées et transférables.
- Fournir une compréhension fine et intégrée des dynamiques spatiales et climatiques des gestions agricoles de montagne, ainsi qu'identifier des clefs d'adaptation concrètes et transférables visant à renforcer la résilience des systèmes agricoles face au changement climatique.

1.5 STRUCTURE DE LA RECHERCHE

Cette recherche s'articule en plusieurs parties. Elle débute par un état de la littérature (chapitre 2), suivi d'une présentation de la méthodologie (chapitre 3), qui détaille à la fois les méthodes statistiques et de modélisation des niches climatiques ainsi que l'approche qualitative fondée sur des entretiens semi-directifs avec les agriculteurs. Viennent ensuite les résultats (chapitre 4), la discussion (chapitre 5), puis les conclusions (chapitre 6).

2. ÉTAT DE L'ART

2.1 AGRICULTURE EN SUISSE

L'agriculture en Suisse est un secteur économique essentiel, mais les conditions de travail sont exigeantes tant au niveau des heures de travail que de la pénibilité physique. Cependant, le salaire demeure relativement modeste, les revenus des familles agricoles plafonnant en moyenne autour de 80 000 CHF ([Confédération suisse, 2024](#)). Par ailleurs, environ deux tiers des agriculteurs travaillent plus de 50 h par semaine ([OFAG, 2019](#)), un chiffre qui ne prend pas en compte le temps investi dans des activités annexes qui visent à compléter les revenus. En effet, la grande majorité des ménages paysans déclarent devoir faire un second travail afin d'améliorer leurs conditions financières ([Confédération suisse, 2024](#)). Par ailleurs, le nombre d'exploitations agricoles ne cesse de diminuer d'année en année. Il est passé de 65 866 en 2003 à 47 719 en 2023, soit une diminution de 18 147 (27,55%) en l'espace de 20 ans ([OFAG, 2024a](#)).

L'agriculture en Suisse représente davantage qu'une simple branche économique : elle est un fondement historique, culturel et écologique du pays. Près de 35% du sol suisse est consacré à l'agriculture ([ARE, s.d.](#)) – des plaines fertiles du Plateau aux pâturages escarpés des Alpes –, ce qui non seulement sculpte les panoramas symboliques suisses, mais assure aussi une sécurité alimentaire stratégique. Son modèle inédit, caractérisé par une forte variété géographique, se manifeste à travers une multitude de pratiques : des cultures intensives en plaine, les vignobles en terrasses ou encore le pastoralisme en altitude. En Suisse, la typologie des exploitations agricoles découle à la fois des conditions naturelles, des pratiques locales et des orientations fixées par la politique agricole, qui reconnaît la pluralité des missions du secteur.

2.1.1 Les zones de montagne en Suisse

Les différentes zones agricoles de Suisse se distinguent par des critères climatiques, topographiques et d'accessibilité. Ces trois éléments servent de base à une catégorisation du paysage agricole, telle que définie par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) ([OFAG, s.d.](#)). Ce découpage (fig. 1), inscrit dans le cadastre agricole officiel, constitue le fondement juridique des paiements directs différenciés et de l'application de la loi sur l'agriculture (LAgr. art. 4⁵). Ainsi, la mosaïque agricole suisse se caractérise par sept zones agricoles régies par des modalités de gestion et des cadres légaux spécifiques.

Les caractéristiques géographiques de la Suisse imposent une spécialisation agricole distincte. Alors que les régions de plaines se caractérisent par une production céréalière et mécanisée, les régions de montagne, comprenant 41% des exploitations agricoles du pays ([Union Suisse des Paysans, 2024](#)), privilégient l'élevage bovin ainsi que les pratiques d'estivage, notamment

⁵ Loi fédérale sur l'agriculture (LAgr) du 29 avril 1998 (RS 910.1)

à cause de la déclivité élevée. Un tiers de la surface agricole utile (SAU) helvétique est d'ailleurs consacré aux surfaces d'estivage (Mann et al., 2019).

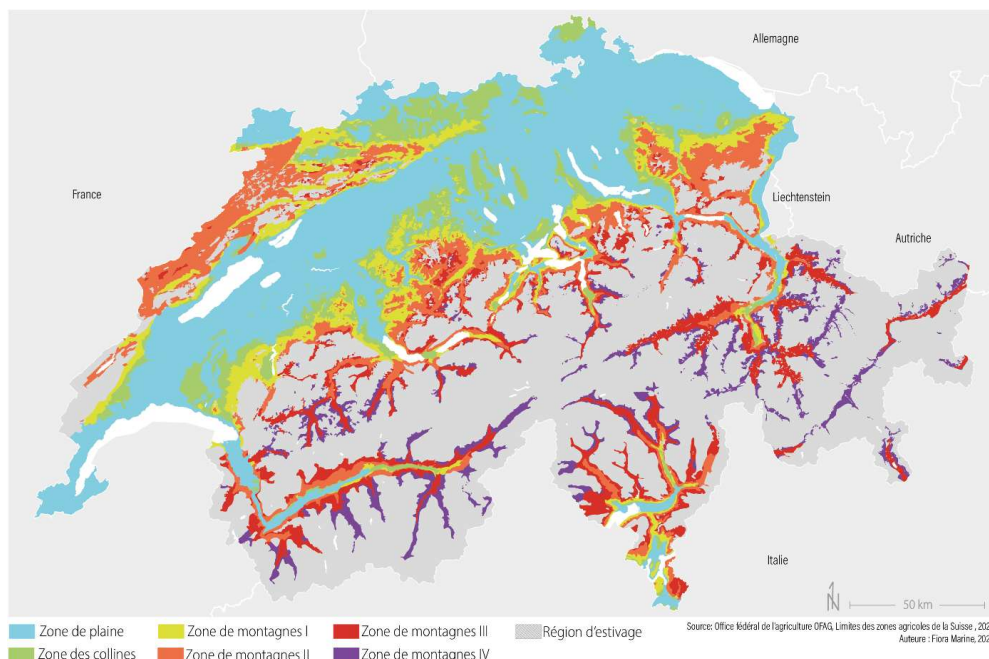


Figure 1 : Localisation des différentes zones agricoles en Suisse

Cette organisation territoriale, basée sur les traits géographiques et agroécologiques du territoire, ne sert pas uniquement de moyen descriptif : elle est un pilier crucial pour l'application des politiques agricoles en Suisse. Ainsi, les différentes parcelles agricoles alpines se situent dans les zones de montagne (1 à 4) ou encore dans les régions d'estivage.

2.1.2 Les piliers de l'agriculture en Suisse

L'article 104 Cst⁶. promeut une agriculture avec trois facettes principales : une économie compétitive, un attrait pour la conservation de la biodiversité ainsi qu'une promotion des zones rurales (art.1 LAgr⁷ et art.70 à 72 OPD⁸). De ce fait, la Suisse se focalise non pas uniquement sur la production alimentaire de plaine, mais aussi sur les productions de montagne telles que le lait, le fromage AOP ainsi que sur le maintien des zones de montagne.

La politique agricole suisse est basée sur des principes de contribution. Les paiements directs, mécanisme principal de ce système, attribuent des subventions spécifiques pour les services écosystémiques tels que la gestion des paysages ou la préservation des sols – des atouts publics dont la valeur excède de loin les indicateurs financiers. Certaines régions alpines voient alors les subventions être majorées par rapport à la plaine, compensant le désavantage des régions de montagnes tout en préservant une répartition équilibrée des exploitations agricoles et des espaces ruraux occupés sur le territoire, essentielle à la lutte contre le dépeuplement alpin.

⁶ Constitution fédérale de la Confédération suisse du 18 avril 1999 (RS 101), en vigueur depuis le 1er janvier 2000.

⁷ Loi fédérale sur l'agriculture (LAgr) du 29 avril 1998 (RS 910.1)

⁸ Ordonnance sur les paiements directs (OPD) du 23 octobre 2013 (RS 910.13)

L'éligibilité aux paiements directs est strictement régie par l'ordonnance sur les paiements directs (OPD⁹). Pour en bénéficier, les exploitants doivent avoir une formation agricole ainsi que respecter les différentes législations agricoles, sans quoi les contributions peuvent être suspendues, conformément à l'article 70 de la LAgr¹⁰ et à l'article 105 de l'OPD. Ainsi, chaque pilier de la politique agricole suisse – sécurité alimentaire, durabilité environnementale et cohésion territoriale – s'appuie sur un cadre juridique précis, soutenu par des contributions financières différenciées selon les caractéristiques des zones agricoles (zones de montagne, régions d'estivage, etc.).

2.1.2.1 Le premier pilier : sécurité alimentaire

Le premier pilier de l'agriculture helvétique repose sur une stratégie plurielle : garantir la sécurité alimentaire nationale grâce à une production suffisante, qualitative et résiliente. Les différentes contributions financières (paiements directs) compensent les contraintes topographiques et les risques économiques inhérents à chaque région, notamment les zones de montagnes III et IV (tab. 1). Ce mécanisme incitatif, formalisé à l'art. 72 de la LAgr, fait que les contributions fédérales garantissent un revenu équitable tout en maintenant une activité productive, notamment dans les régions de montagne.

Tableau 1 : Valeurs des différentes contributions pour le soutien au système de production selon les zones de plaine (ZP), les zones de collines (ZC) et les différentes zones de montagne (ZMI à ZMIV). (Valeurs tirées de « Mesures définies en fonction des zones pour 2025 » (OFAG, s.d.)). Ici, MS signifie la masse sèche.

Contributions	ZP	ZC	ZMI	ZMII	ZMIII	ZMIV
Contribution à la production dans des conditions difficiles ¹¹ (CHF/ha)	-	390	510	550	570	590
Contribution pour la production de lait et de viande basée sur les herbages ¹²	75% de la MS	75 % de la MS	85 % de la MS	85 % de la MS	85 % de la MS	85 % de la MS

2.1.2.2 Le deuxième pilier : promotion de la biodiversité

La promotion de la biodiversité constitue le deuxième pilier fondamental de la politique agricole actuelle, concrétisé par les prestations écologiques requises (PER) qui encadrent strictement les pratiques des exploitations. Conformément à l'annexe 1 de l'OPD, ces exigences transforment l'activité agricole en un levier de protection des ressources naturelles (sols, eau, air) tout en tout en protégeant strictement les écosystèmes locaux, en garantissant leur préservation et leur équilibre naturel. Ce cadre réglementaire s'articule autour d'un système de contributions différenciées, conçu pour récompenser les efforts proportionnellement à leur impact environnemental (art. 74 à 76 LAgr).

⁹ Ordonnance sur les paiements directs (OPD) du 23 octobre 2013 (RS 910.13)

¹⁰ Loi fédérale sur l'agriculture (LAgr) du 29 avril 1998 (RS 910.1)

¹¹ Art. 52 et annexe 7, ch. 2.2, OPD.

¹² Art. 71 et annexe 5, ch. 1, OPD.

Certaines de ces mesures sont cristallisées par la création de dispositifs de protection des paysages¹³ (art. 74 LAgr¹⁴; art. 63 OPD¹⁵) ainsi que de réseaux écologiques¹⁶ (art 16.b LPN¹⁷ ; art. 16.b OPD) ou encore de surfaces de promotion de biodiversité (SBP) (art.73 LAgr ;art.16.b OPD).Les SPB bénéficient de deux niveaux de financement. Le premier niveau, appelé qualité 1 ou Q1, est régi par l’art. 73 de la LAgr et inclut les surfaces agricoles respectant le cahier des charges des PER. Le second niveau (qualité 2 ou Q2), défini à l’art. 59 OPD, offre des contributions supplémentaires à celle de la Q1 lorsque les parcelles répondent à des critères plus stricts en matière de biodiversité. Ces surfaces doivent démontrer une diversité floristique élevée et des structures paysagères complexes (lisières étagées, mares, bosquets), offrant des habitats optimaux pour la faune.

Ce double mécanisme incitatif, combiné aux différentes zones agricoles (tab. 2), permet d’adapter non seulement les mesures, mais aussi les aides selon les spécificités régionales. Les zones de montagne voient ainsi leurs contributions majorées pour compenser les contraintes climatiques, tout en protégeant les écosystèmes alpins. Cette approche graduelle assure une transition, où chaque exploitation, quelle que soit sa localisation, participe activement à la préservation du patrimoine naturel helvétique.

Tableau 2 : Valeurs des différentes contributions (CHF/ha) pour le soutien à la biodiversité selon les zones de plaine (ZP), les zones de collines (ZC) et les différentes zones de montagne (ZMI à ZMIV). (Valeurs tirées de « Mesures définies en fonction des zones pour 2025 » (OFAG, s.d.)).

Contributions	ZP	ZC	ZMI	ZMII	ZMIII	ZMIV
Q1 Prairies extensives ¹⁸	780	560	300	300	300	300
Q1 Surface à litière ¹⁹	1440	1220	860	860	680	680
Q2 Prairies extensives ²⁰	1920	1840	1700	1700	1100	1100
Q2 Prairies peu intensives ²¹	1540	1470	1360	1360	1000	1000
Q2 Surface à litière ²²	2060	1980	1840	1840	1770	1770

2.1.2.3 Le troisième pilier : entretien du paysage rural et occupation décentralisée du territoire

L'agriculture suisse a une importance capitale pour la sauvegarde des paysages ruraux et pour la conservation d'une utilisation décentralisée du territoire. Dans ce cadre, un système de contributions spécifiques finance les agriculteurs qui adoptent des méthodes visant à valoriser

¹³Soutien les prestations agricoles qui contribuent à la qualité et diversité des paysages ruraux (vieux arbres fruitiers, terrasses viticoles, etc.).

¹⁴ Loi fédérale sur l’agriculture (LAgr) du 29 avril 1998 (RS 910.1)

¹⁵Ordonnance sur les paiements directs (OPD) du 23 octobre 2013 (RS 910.13)

¹⁶Crée des corridors écologiques et relie les surfaces favorables à la biodiversité (telles que des jachères, mares temporaires, etc.).

¹⁷Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN) du 01 juillet 1967 (RS 451)

¹⁸ Art. 55 à 58, annexe 4 et annexe 7, ch. 3.1, OPD

¹⁹ Idem

²⁰ Art. 55 à 59, annexe 4 et annexe 7, ch. 3.1, OPD

²¹ Idem

²² Idem

les zones à contraintes naturelles, à préserver les paysages ouverts et à assurer la pérennité des pratiques agropastorales, en particulier en montagne. Ainsi, en 2023, ces initiatives ont bénéficié d'un financement de 530 millions de francs (OFAG, 2024a), qui a soutenu trois leviers complémentaires :

- La mise en valeur des zones à contraintes naturelles ;
- Le maintien actif du paysage ouvert, notamment via la lutte contre l’embroussaillage (OFAG, 2024c) ;
- La pérennisation des pratiques agro-pastorales en montagne.

Les montants de ces contributions varient selon les zones agricoles, en fonction des contraintes spécifiques rencontrées (tab. 3).

Tableau 3 : Valeurs des contributions (CHF/ha) pour le maintien du paysage selon les zones de plaine (ZP), les zones des collines (ZC) et les différentes zones de montagne (ZMI à ZMIV). (Valeurs tirées de « Mesures définies en fonction des zones pour 2025 » (OFAG, s.d.)).

Contribution	ZP	ZC	ZMI	ZMII	ZMIII	ZMIV
Contribution pour le maintien d'un paysage ouvert ²³	-	100	230	320	380	390

2.2 CADRE LÉGAL ET POLITIQUES PUBLIQUES À INCIDENCE SPATIALE EN LIEN AVEC L’AGRICULTURE DE MONTAGNE

2.2.1 Loi fédérale sur l’aménagement du territoire (LAT)

En Suisse, l’aménagement du territoire est régi à trois niveaux – Confédération, cantons et communes – selon la loi fédérale sur l’aménagement du territoire (art. 1 LAT²⁴), qui vise une utilisation mesurée du sol et une séparation stricte entre zones constructibles et non constructibles. Il s’agit d’un travail important de coordination entre les différents acteurs du terrain, des contraintes naturelles ainsi que des besoins de la population et de l’économie. Plusieurs zones d’affectation sont définies : les zones à bâtir qui sont propres à la construction, les zones agricoles sur lesquelles se trouvent les terrains qui se prêtent à l’exploitation, les zones à protéger ainsi que d’autres zones et territoires tels que les territoires improductifs.

Cette approche prend une dimension particulière en montagne, où les contraintes naturelles (fortes pentes, risques naturels, accès difficile, altitude) limitent fortement les possibilités de construction et d’exploitation agricole. La majorité des zones de montagne est classée comme territoire improductif, mais elles jouent un rôle essentiel dans l’équilibre écologique et la préservation du paysage.

Il est délibérément compliqué de modifier ce zonage : une modification d'utilisation n'est envisageable que si elle répond à un intérêt public majeur, s'inscrit dans le plan directeur

²³ Annexe 7, ch. 1.1.1, OPD
²⁴ Loi fédérale sur l’aménagement du territoire (LAT) du 22 juin 1979. (RS 700).

cantonal et respecte les conditions définies par la LAT²⁵. Depuis la modification de celle-ci en 2014, ces critères ont été renforcés, principalement pour contrer l'expansion des constructions et protéger les terres agricoles. Les processus sont étendus, rigoureux et doivent prévoir des compensations en cas de sacrifice de terres agricoles. Cette rigueur dénote la détermination politique à conserver un équilibre pérenne entre le développement et la préservation des espaces non-bâti.

2.2.2 Loi fédérale sur les forêts (LFo)

Une des « autres zones ou territoires » définies par la LAT sont constituées par les aires forestières (art. 18 LAT²⁶), qui occupent une place centrale, couvrent de vastes superficies et jouent un rôle écologique, économique et social fondamental. Ainsi, la loi fédérale sur les forêts complète la LAT et constitue un verrou juridique régulant l'usage du sol en Suisse (LFo²⁷). L'un des principes clef de cette loi est la stabilité du périmètre forestier : il est interdit de défricher sans autorisation spécifique de la Confédération et toute autorisation découle sur le fait de compenser cette coupe sur un autre terrain. Concernant les activités d'exploitation forestière et de coupe d'arbres, elles relèvent des compétences au niveau cantonal et/ou communal.

Cette politique rigoureuse a contribué à la stabilité, de la superficie forestière au cours des dernières décennies. Dans un contexte de pression accrue sur les terrains, particulièrement dans les régions montagneuses ou les zones de villégiature, la LFo²⁸ joue donc un rôle de rempart juridique solide contre la transformation ou le changement d'affectation des forêts en terres agricoles ou constructibles. Elle contribue à garantir une cohérence dans la planification et la gestion du territoire en freinant les processus de transformation des espaces naturels et assure une gestion multifonctionnelle du couvert forestier, indispensable pour l'équilibre des écosystèmes alpins.

2.2.3 Catégories des parcelles agricoles

L'agriculture helvétique s'articule elle aussi autour d'une gestion territorialisée, où les spécificités régionales (altitude, climat, topographie) et l'affectation des parcelles déterminent les pratiques culturelles. Ce cadre est structuré par un système de codification rigoureux établi par le Service des paiements directs (OPD) de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG), qui répertorie 174 *codes cultures* regroupés en catégories fonctionnelles (grandes cultures, surfaces fourragères, cultures spécialisées, etc.) (OFAG, 2024b). Chaque code, associé à des exigences agronomiques et écologiques précises, conditionne l'accès à des contributions financières différenciées (OFAG, Unité de direction Paiements Directs et développement rural, 2023) (tab. 4).

²⁵ Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT) du 22 juin 1979. (RS 700).

²⁶ Idem

²⁷ Loi fédérale sur les forêts (LFo) du 04 octobre 1991. (RS 921).

²⁸ Idem

Tableau 4 : Catégories des codes cultures (OFAG, 2024b).

<i>Codes</i>	<i>Description</i>	<i>Exemples</i>
501-602 ²⁹	Les terres assolées	Orge de printemps (501), avoine (504), pommes de terre (524), tabac (541), jachère florale (556), etc.
611-698	Les surfaces herbagères permanentes	Prairies peu intensives (612), pâturages extensifs (617), prairies de fauche en région d'estivage autres (621), etc.
701-798	Les surfaces de cultures pérennes	Vignes (701), plantes aromatiques et médicinales pluriannuelles (706), permaculture (725), etc.
801-849	Les surfaces de cultures sous abri pendant toute l'année	Cultures des baies sous serres avec fondations permanentes (804), champignons sous abri avec fondations permanentes (810), autres cultures sous abri avec fondations permanentes (848), etc.
851-898	Les autres surfaces comprises dans la SAU	Surfaces à litière dans la SAU (851), haies, bosquets champêtres et berges boisées (avec la bande herbeuse) (852), autres surfaces dans la SAU donnant droit aux contributions (897), etc.
901-911 ³⁰	Les surfaces non comprises dans la SAU	Forêt (901), fossés humides, mares et étangs (904), murs de pierres sèches (906), etc.
930-936	Les surfaces dans la région d'estivage	Pâturages d'estivage (930), pâturages communautaires (933), surfaces à litière, région d'estivage (936), etc.
921-929	Les autres éléments	Arbres fruitiers haute tige (921), châtaigniers (923), arbres isolés remarquables (925), etc.

Le passage d'un code de culture à un autre est possible, mais strictement encadré : toute modification doit être déclarée et justifiée, car elle a des répercussions importantes sur les paiements directs (PD), les contributions écologiques et la gestion intégrée du territoire. En effet, un changement de code peut influencer les critères d'éligibilité aux aides et impacter la planification agricole et territoriale au niveau local.

Cependant, la classification détaillée des terres agricoles doit être appréhendée en tenant compte des contraintes environnementales qui régissent les pratiques agricoles sur le terrain. Le climat constitue un facteur clef, influençant directement le choix des cultures adaptées, la fertilité et la dynamique des sols. Par ailleurs, la viabilité économique des exploitations agricoles dépend certes de plusieurs facteurs, mais dans les régions de montagne, les conditions climatiques rigoureuses représentent une contrainte importante à laquelle les agriculteurs doivent s'adapter. En Suisse, la diversité climatique est largement liée à la variabilité géographique, ce qui impose une adaptation constante des systèmes agricoles aux spécificités locales et aux variations climatiques.

2.3 LE CLIMAT EN SUISSE

Englobant une partie des Alpes et du Jura, la Suisse se caractérise par une topographie complexe qui contribue à une diversité climatique remarquable. Cette variété orographique

²⁹ Contient aussi les 631 et 632

³⁰ Contient aussi le 998

influence non seulement les vents, mais aussi la température et les précipitations, qu'elles soient sous forme de pluie ou de neige ([CH2018, 2018](#)). La chaîne des Alpes agit comme une réelle barrière climatique entre le nord et le sud du pays, influençant non seulement les températures, mais aussi les précipitations.

L'effet de la continentalité se manifeste particulièrement dans les vallées alpines intérieures, où l'éloignement par rapport aux influences océaniques et la présence de hauts reliefs limitent l'arrivée des masses d'air humides. Ceci entraîne des conditions climatiques nettement plus sèches. Par exemple, Sion, qui se situe dans la vallée du Rhône, figure parmi les régions les plus sèches du pays, avec des précipitations annuelles proches de 600 mm ([CH2018, 2018](#)). D'autres régions sont cependant beaucoup plus exposées, telles que les Préalpes comme la station de Château-d'Oex qui reçoit en moyenne 1 300 mm de précipitations par an ([MétéoSuisse, s.d.\(a\)](#)). De plus, ces régions présentent des conditions de températures très différentes : elles varient fortement selon l'altitude et l'exposition, mais aussi avec l'influence des vents, comme le foehn qui est chaud et sec dans les vallées et en plaine ([CH2018, 2018](#)).

Cette diversité climatique s'accompagne de variations pédologiques et géographiques marquées. En conséquence, le territoire suisse est divisé en six régions biogéographiques (fig. 2) : le Jura, le Plateau, le versant nord des Alpes, les Alpes centrales occidentales, les Alpes centrales orientales et le versant sud des Alpes ([OFEV, 2022](#)). Ces régions biogéographiques présentent des conditions abiotiques variées, notamment en termes de climat, de sols, d'hydrologie et de géographie. Cette catégorisation s'est faite en se basant sur neuf critères climatiques, géologiques et topographiques ([Lehmann et al., 2010](#)).

Cette diversité climatique a une incidence directe sur l'agriculture en altitude : dans les vallées sèches et bien orientées, on observe principalement des plantations qui requièrent peu d'eau ou qui sont irriguées, telles que la vigne et les arbres fruitiers. En revanche, dans les régions plus humides et situées à une altitude plus élevée, l'agriculture est surtout dominée par les prairies naturelles, le pâturage et l'élevage extensif. Par conséquent, la sélection des cultures et des méthodes agricoles en milieu montagnard est fortement influencée par les contraintes climatiques spécifiques, qui définissent la productivité, la diversité et la capacité de résistance des parcelles.

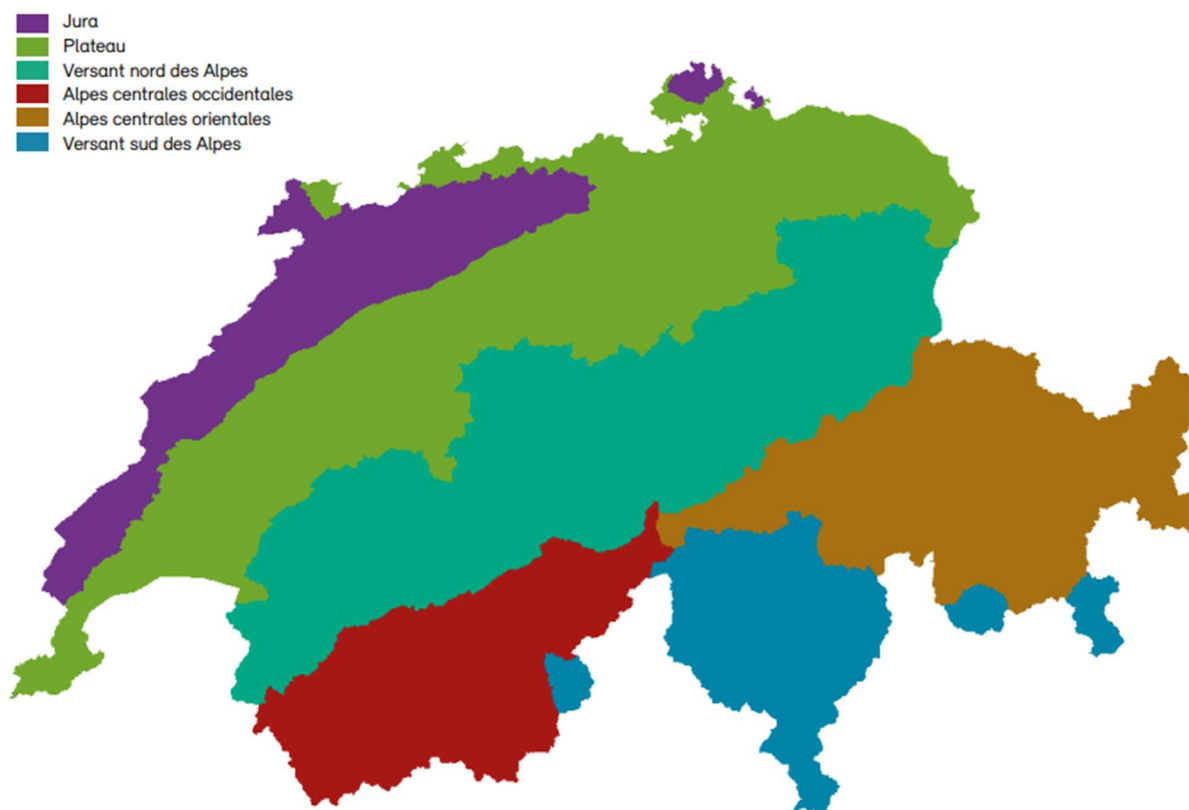


Figure 2 : Découpage des différentes régions biogéographiques suisses (OFEV, 2022, p. 11)

2.3.1 Le changement climatique en Suisse

2.3.1.1 Le changement climatique depuis le 19^e siècle

L'un des effets les plus importants du changement climatique est la hausse des températures. En Suisse, c'est un phénomène qui s'accroît depuis la fin des années préindustrielles (1850-1900). On remarque une hausse de 2,5 °C par rapport à la période de référence 1871-1900, soit plus du double de la moyenne mondiale (1,2 °C) (CH2018, 2018; OFEV, MétéoSuisse & NCSS, 2020; OFEV, 2023). Cette différence avec la moyenne globale s'explique par le fait que la Suisse, pays enclavé, subit un réchauffement plus rapide en raison de l'absence de courants marins et de l'effet de continentalité (OFEV, MétéoSuisse & NCSS, 2020; Eriksen & Hauri, 2021). De plus, la hausse des températures est encore plus sérieuse dans les vallées à foehn ou les vallées fortement ensoleillées (MétéoSuisse, 2014). L'élévation des températures se manifeste aussi par la hausse de la limite de l'isotherme 0 °C, qui progresse d'environ 150m par degré supplémentaire (CH2018, 2018; OFEV, MétéoSuisse & NCSS, 2020).

Cette élévation provoque une transformation du type de précipitations, avec une part croissante de pluie au détriment de la neige, affectant ainsi le *snow water equivalent* (quantité de neige en surface). La réduction des quantités de neige et de la durée d'enneigement a des répercussions sur l'albédo qui diminue, et le sol absorbe plus de lumière et donc, de chaleur (Björnsen Gurung & Stähli, 2014). Ces fontes précoces provoquent des débits élevés au printemps dans les cours d'eau alimentés par la fonte glaciaire (Björnsen Gurung & Stähli, 2014; Reynard et al., 2014) tandis que les réserves en eau de surface s'amenuisent en été en raison de sécheresses plus fréquentes (OFEV, 2017). Finalement, bien que le volume annuel

de pluie reste plutôt constant au niveau national, leur répartition et leur intensité changent. On constate une hausse des phénomènes extrêmes et un déclin des précipitations durant l'été, ce qui accroît les dangers de manque d'eau et de stress hydrique (CH2018, 2018).

2.3.1.2 Projections climatiques pour le 21^e siècle

Si ces changements sont déjà perceptibles actuellement, les prévisions pour les décennies à venir indiquent une intensification notable de ces tendances (CH2018, 2018; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Pour prévoir ces changements, le GIEC recourt à des scénarii climatiques connus sous le nom de RCP (*Representative Concentration Pathways*), qui simulent l'évolution du climat en fonction des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre. Chaque scénario est défini par un niveau de forçage radiatif exprimé en watts par mètre carré (W/m²) à l'horizon 2100, par rapport aux niveaux préindustriels (vers 1850) (NCSS, 2018; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Trois scénarii sont alors décrits : RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5.

Les scénarii climatiques CH2018 pour la Suisse ont été élaborés dans le cadre du *National Centre for Climate Services* (NCCS), qui regroupe plusieurs institutions fédérales et de recherche. Ce rapport est le fruit d'une collaboration entre le Conseil fédéral suisse, l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ), le *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research* (WSL), et le *Centre for Climate System Modeling* de l'ETH Zurich (CH2018, 2018). CH2018³¹ se base sur les analyses faites par Euro-Cordex (12 et 50 km de résolution) et produit alors des projections pour les scénarii RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 (Fischer et al., 2022). Ils décrivent comment le climat suisse pourrait évoluer d'ici 2100, selon différents scénarii d'émission de gaz à effet de serre. Ainsi, CH2018 propose des projections à échelle suisse avec une résolution plus fine (2 km), devenant de ce fait la base sur laquelle les plans d'adaptation au changement climatique sont basés (Fischer et al., 2022).

Le scénario RCP 2.6 est celui d'une forte atténuation des émissions de gaz à effet de serre, visant à limiter le réchauffement climatique à moins de 2°C d'ici la fin du siècle, conformément aux objectifs de l'Accord de Paris. En Suisse, ce scénario suppose la mise en œuvre rapide et efficace de mesures de protection du climat, telles que la réduction immédiate des émissions mondiales. Avec ce scénario, la hausse des températures serait contenue, les précipitations estivales diminueraient moins drastiquement qu'avec des scénarii plus sévères, et la fréquence des événements extrêmes (canicules, sécheresses) resterait aussi plus modérée (CH2018, 2018; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021; NCSS, 2024).

Le scénario RCP 4.5 est un scénario « optimiste réaliste ». Il suppose que le monde réussit à réduire ses émissions de CO₂ progressivement, grâce à des politiques climatiques, des innovations technologiques (énergies renouvelables, efficacité énergétique), et des changements de comportement (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Les

³¹ Le projet « Climat CH2025 » a démarré début 2023. Il vise à mettre à jour les scénarii climatiques actuels en fonction des dernières avancées scientifiques et à prendre en considération les exigences supplémentaires des utilisatrices et utilisateurs. L'objectif du projet est d'élaborer, d'actualiser et de mettre à disposition les bases physiques du changement climatique en Suisse. La publication des résultats est prévue pour fin 2025 (MétéoSuisse, s.d.). Ainsi, ces données n'ont pas pu être utilisées pour cette étude.

émissions de gaz à effet de serre atteindraient leur maximum vers 2040, puis commenceraient à baisser (CH2018, 2018). En Suisse, ce scénario permettrait de limiter fortement la fonte des glaciers, même si de nombreux petits glaciers disparaîtraient. Les risques de canicules, de sécheresses et de pertes de biodiversité seraient importants, mais gérables avec des mesures d'adaptation (CH2018, 2018).

Le scénario RCP 8.5 est souvent surnommé le scénario du « tout continue comme avant » (« *business as usual* ») (CH2018, 2018; NCSS, 2024). Il suppose que les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter fortement, sans politique climatique ambitieuse. Cela pourrait être dû à une forte croissance démographique, à l'utilisation continue du charbon et du pétrole, et à l'absence d'accords internationaux efficaces. En Suisse : dans ce scénario, la quasi-totalité des glaciers alpins aurait disparu d'ici 2100. Les canicules seraient beaucoup plus fréquentes, les dangers naturels (éboulements, crues) plus élevés, et la biodiversité alpine fortement bouleversée (CH2018, 2018).

Cette tendance semblerait s'intensifier avec le temps, notamment avec le scénario RCP 8.5 : les températures continueraient de grimper et la limite hivernale de l'isotherme 0 °C pourrait voir sa moyenne augmenter de 850 m à 1500 m en 2050 (OFEV, MétéoSuisse & NCSS, 2020; OFEV, 2023). En ce qui concerne les précipitations, leur régime devrait également évoluer : on prévoit une diminution de 10% à 24% des précipitations estivales d'ici 2085, tandis qu'en hiver, elles devraient passer de 12% à 22% (CH2018, 2018). Cette modification implique une raréfaction des jours de pluie en été (NCSS, 2018; OFEV, 2023). Par ailleurs, la réduction des forçages aérosols et de la nébulosité pourrait également intensifier les chaleurs estivales dans les prochaines décennies, augmentant ainsi la fréquence et la gravité des canicules (Teuling et al., 2013).

2.3.2 Impact du changement climatique sur la végétation de montagne

Le changement climatique exerce une influence significative sur la flore. Avec le réchauffement des températures, les épiaisons et le développement printanier des herbages deviennent de plus en plus précoces. On estime que le développement avance de 2 à 3 jours par décennie dans les zones de basse altitude (Vuffray et al., 2016). Une fonte des neiges plus précoce et des températures plus clémentes favorisent la croissance des plantes. Certaines plantes seront donc avantagées, comme l'achillée (Lauber et al., 2014). De plus, le réchauffement permet alors d'alper plus tôt dans la saison et d'augmenter le temps d'estive (Lauber et al., 2014). La période de végétation a déjà augmenté de 2 à 4 semaines de plus que dans les années 1960 (OFEV, MétéoSuisse & NCSS, 2020) et devrait continuer de s'accroître (Mosimann et al., 2017). Dans les Préalpes, cette période pourrait s'allonger et passer de 25 à 40 jours d'ici 2060 (MétéoSuisse, 2014). Par exemple, dans les régions du Pays d'Enhaut, où les précipitations sont fréquentes et abondantes en été (Demierre et al., 2018), la hausse des températures pourrait accroître la production.

La hausse des températures présente un double tranchant : dans les régions plus humides, elle augmente la productivité fourragère, tandis que dans les régions plus sèches, comme les zones karstiques ou intra-alpines, le stress hydrique est accru (Lauber et al., 2014). En période

de sécheresse, la productivité des fourrages diminue, car les plantes ferment davantage leurs stomates, ralentissant ainsi leurs processus de photosynthèse et leur métabolisme, ce qui freine leur croissance. Bien que les différentes espèces ne soient pas toutes affectées de manière uniforme (Meisser et al., 2013), elles tendent généralement à être moins hautes et plus sèches, réduisant ainsi leur biomasse de manière significative (Meisser et al., 2013; Mosimann et al., 2017). Ceci a des implications sur la croissance des plantes, sur la biomasse des espèces (Calanca et al., 2016), ainsi que sur la teneur en nutriments et la valeur nutritive du fourrage (Mosimann et al., 2017).

Cependant, la hausse des températures favorise la colonisation de la végétation à des altitudes plus élevées (Walther et al., 2005; Parolo & Rossi, 2006) en raison de conditions climatiques plus clémentes. Cette expansion permet aux espèces de se développer et de se reproduire à des altitudes supérieures, entraînant ainsi une modification de la composition des communautés végétales alpines. On observe notamment une augmentation de la richesse spécifique, bien que modérée dans les prairies alpines, mais plus marquée dans les zones de végétation subnivale et nivale (Pauli et al., 2007). Cette dynamique s'accompagne d'un déclin des espèces alpines, subalpines et montagnardes, tandis que celles des régions collinéennes tendent à se développer (Pauli et al., 2007; Engler et al., 2011). Cette évolution est néanmoins atténuée dans les régions isolées, où la colonisation s'avère plus lente (Vittoz et al., 2009). De plus, la proximité de végétation productive aux abords des marges glaciaires influe sur le temps de latence entre la fonte des glaces et l'apparition de nouvelles espèces végétales.

Par ailleurs, cette montée en altitude des espèces pose un problème majeur pour celles strictement adaptées au froid, dont l'habitat se réduit considérablement (Randin et al., 2009b). Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les régions où ces espèces occupent déjà les plus hautes altitudes, comme les sommets des Préalpes. Ne pouvant migrer davantage, elles sont alors confrontées à un risque accru d'extinction (Dirnböck et al., 2003; Walther et al., 2005; Engler et al., 2011). Au-delà des changements dans la composition spécifique, l'augmentation de la couverture de certaines espèces dominantes entraîne une diminution de la diversité spécifique (Vittoz et al., 2009). Cela conduit progressivement à une homogénéisation des communautés végétales, avec une perte de biodiversité. Cependant, cette évolution n'est pas uniforme : elle dépend fortement de la profondeur de neige sur le site (Seastedt & Oldfather, 2021).

Enfin, l'élévation de la limite des forêts constitue un autre facteur de pression, réduisant l'espace disponible pour certaines espèces (Dirnböck et al., 2011).

2.4 AGRICULTURE SUISSE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'utilisation des terres agricoles varie ainsi selon les régions biogéographiques, l'altitude et l'exposition, chaque combinaison de facteurs créant des conditions spécifiques propices à certains types de cultures. Répertorier ces conditions permet de corrélérer l'utilisation actuelle du territoire aux conditions climatiques et abiotiques et d'ainsi comprendre leurs utilisations et leurs niches climatiques.

Plusieurs études ont démontré que les facteurs bioclimatiques influencent fortement non seulement la distribution des espèces animales et végétales, mais aussi la répartition des différents types d'utilisation du sol à l'échelle européenne (Thuiller et al., 2004).

Le climat apparaît comme le principal facteur déterminant la distribution à grande échelle des espèces et des types de couverture terrestre en Europe. Cependant, l'importance de l'utilisation du sol dans la compréhension et la modélisation de la distribution des espèces a aussi été soulignée par plusieurs études (Zimmermann & Kineast, 1999; Randin et al., 2009a), bien que ce facteur reste parfois négligé malgré son potentiel à améliorer notre compréhension des patterns de distribution des différentes parcelles agricoles.

Actuellement, environ 20% de l'utilisation des sols a déjà changé au cours des trente dernières années (OFEV, 2022), sous l'effet combiné de l'évolution des pratiques agricoles, de la déprise et des changements de gestion. L'utilisation du sol comme la pâture ou encore le maintien forestier influence aussi la distribution des différentes espèces (Dirnböck et al., 2003). Ainsi, le climat est à prendre en compte, mais l'utilisation et le maintien du sol sont aussi hautement importants et peuvent de ce fait modifier la répartition de différentes espèces (Vittoz et al., 2009).

Le changement climatique pourrait modifier l'équilibre agricole actuel. Des recherches concernant l'impact du changement climatique ont déjà eu lieu dans le Jura, notamment en ce qui concerne des recherches sur le fourrage (Mosimann et al., 2012; Mosimann et al., 2017). En effet, bien que cette région soit relativement humide de par le fait que la chaîne de montagnes constitue une barrière pour les précipitations océaniques (Reynard & Schoeneich, 2021), la nature karstique de ses roches en fait une région où la sécheresse est accrue et les ressources en eau de surface rares (Bjørnsen Gurung & Stähli, 2014), pouvant ainsi accentuer le risque de sécheresse agricole (Köllner et al., 2017).

Les adaptations et difficultés rencontrées dans le Jura peuvent ainsi être considérées comme des signaux précurseurs des enjeux auxquels seront confrontées, à des degrés divers, l'ensemble des régions de montagne suisses dans les décennies à venir. En effet, selon les projections du GIEC (scénario RCP8.5), qui prédisent une augmentation mondiale des températures d'au moins 4 °C d'ici 2100 par rapport à l'ère préindustrielle (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), cela aura des effets notables sur les températures et les précipitations en Suisse, deux facteurs déterminants pour les conditions climatiques régionales. D'ici 2050, les températures pourraient augmenter de 3,5 °C en Suisse si la courbe d'émission RCP8.5 est suivie (CH2018, 2018).

Si certaines parcelles agricoles, telles que les prairies, pourraient bénéficier d'une période de croissance prolongée (Calanca et al., 2005; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), d'autres pourraient subir les effets négatifs de la sécheresse, des vagues de chaleur ou de l'augmentation des phénomènes naturels tels que les crues (Tobias et al., 2023). De plus, des changements dans les paysages sont attendus, notamment la montée de la limite des arbres (*treeline*), le recul des glaciers et l'évolution de l'utilisation du sol (Tobias et al., 2023) ou encore la déprise agricole, qui, combinée au changement climatique, peuvent avoir des

impacts importants sur les dynamiques de la végétation montagnarde ([Alexandre & Birre, 2022](#)).

Les différents changements climatiques attendus peuvent ainsi avoir des influences majeures sur la gestion agricole, la productivité, la biodiversité et la résilience des systèmes. Cette évolution risque d'amplifier les changements déjà observés dans l'utilisation du sol, avec des conséquences sur la distribution des espèces, la structure des paysages et la durabilité de l'agriculture suisse.

2.4.1 Appréhender les niches climatiques

Les évolutions climatiques et les changements d'usage du sol décrits précédemment ont donc des répercussions profondes sur la distribution des espèces, en modifiant les conditions qui sous-tendent leur présence et leur abondance. Pour analyser ces dynamiques, il est essentiel de s'appuyer sur le concept de niche ([Hutchinson, 1957](#)), qui offre un cadre théorique pour relier les exigences environnementales des espèces aux nouvelles réalités du territoire suisse.

La notion de niche est une notion pouvant être incomprise ou, du moins, intervertie avec d'autres notions telles que l'habitat ou encore l'environnement. Afin d'éclaircir cette notion, chaque élément est défini selon les explications données par Kearney ([2006](#)).

- L'habitat désigne l'ensemble des conditions physiques et biotiques d'un espace dans lequel une espèce vit et se développe. Il est caractérisé par des facteurs abiotiques (sol, climat, relief) et biotiques (plantes, animaux, micro-organismes) qui influencent la présence, la distribution et l'abondance de cette espèce. L'habitat peut être défini indépendamment d'un organisme particulier, bien que la possibilité d'y vivre soit souvent sous-entendue.
- L'environnement correspond à tout ce qui entoure un organisme, incluant les composantes physiques, chimiques et biologiques. Il résulte non seulement des caractéristiques naturelles du milieu, mais aussi de l'influence active de l'organisme lui-même (par exemple, par ses comportements, ses interactions ou ses modifications du milieu), ce qui crée une relation dynamique entre l'organisme et son environnement.
- La niche écologique est l'ensemble des conditions et ressources nécessaires à la survie et à la reproduction d'une espèce. Elle définit le rôle spécifique qu'une espèce occupe dans son environnement.

La niche écologique d'une espèce peut être conceptualisée comme un hypervolume multidimensionnel, qui regroupe l'ensemble des conditions abiotiques, biotiques ainsi que les ressources nécessaires à sa survie, à sa croissance et à sa reproduction ([Hutchinson, 1957](#)). Cette représentation inclut non seulement les facteurs environnementaux (comme le climat, le sol, l'altitude), mais aussi les interactions avec d'autres espèces (compétition, prédation, mutualisme) et les limites spatiales liées aux zones potentiellement colonisables. La niche peut être divisée en deux catégories principales : la niche fondamentale, qui correspond aux conditions optimales pour l'espèce, et la niche réalisée, qui reflète les conditions

effectivement occupées par l'espèce dans un environnement où elle coexiste avec des compétiteurs (Hutchinson, 1957).

Dans la pratique, la niche écologique est souvent définie à partir des conditions environnementales observées là où l'espèce est présente. Cette approche permet de déduire ses préférences écologiques spécifiques (Austin et al., 1990), même si elle est influencée par les conditions locales de compétition ou de limitation de dispersion. Par ailleurs, les caractéristiques topographiques et géographiques jouent un rôle déterminant dans la répartition spatiale des niches réalisées, en modulant localement les contraintes et les opportunités environnementales (Ackerly, 2003). Des conditions locales comme l'exposition, l'altitude ou l'effet de barrière peuvent ainsi restreindre ou étendre l'aire de présence d'une espèce indépendamment de sa niche fondamentale.

Dans ce contexte, le calibrage de la niche écologique constitue une étape clef pour comprendre la répartition des espèces dans l'espace. L'utilisation de données climatiques à haute résolution permet d'affiner ce calibrage, offrant ainsi des représentations plus précises des niches écologiques et une meilleure capacité à prédire la distribution des espèces, en particulier dans les zones à topographie complexe, où les conditions environnementales varient fortement sur de petites distances (Randin et al., 2009b; Kriticos & Leriche, 2010).

Toutefois, cette répartition n'est pas figée. Le changement climatique entraîne une modification progressive des conditions environnementales, qui influe directement sur les paramètres abiotiques structurant les niches fondamentales (Ackerly, 2003). En conséquence, certaines espèces peuvent déplacer leur niche optimale vers de nouvelles zones géographiques, traduisant une forme de réponse adaptative au changement (Ackerly, 2003). Cependant, seule la niche fondamentale est susceptible de se modifier pleinement en réponse à ces pressions ; la niche réalisée reste, elle, contrainte par les facteurs biotiques, la compétition et la capacité de dispersion. Cette dissociation implique que certaines espèces possèdent une tolérance écologique plus large que celle qu'on observe actuellement (Vetaas, 2002), mais qu'elles ne peuvent exploiter pleinement en raison de limitations externes.

Enfin, cette dynamique d'ajustement n'est pas universelle : certaines espèces, en particulier celles dotées de niches étroites ou vivant déjà à la limite de leurs conditions physiologiques, comme de nombreuses plantes alpines, pourraient ne pas être capables de s'adapter assez rapidement. Elles risquent alors de perdre leur niche climatique au profit d'espèces plus compétitives, ce qui pourrait mener à leur régression, voire à leur extinction (Ackerly, 2003).

2.4.2 Visualiser les niches : modèles de distributions des espèces

Les modèles de distribution d'espèces (SDM, *Species Distribution Models*) sont des outils clefs en écologie pour comprendre, prédire et cartographier la répartition spatiale de différentes espèces en fonction de variables environnementales. Ils reposent sur l'hypothèse que la présence d'une espèce est étroitement liée à leur niche écologique. Ils s'appuient sur l'analyse statistique des relations entre les occurrences observées d'une espèce (présences, absences ou pseudo-absences) et des facteurs tels que le climat, le type de sol ou encore l'occupation du sol (Guisan et al., 2017). Ces modèles permettent ainsi de caractériser les conditions

écologiques favorables à une espèce et d'estimer sa distribution potentielle, tant actuelle que future. Utilisés dans des domaines variés tels que la prédiction d'espèces végétales (Guisan et al., 1998; Austin, 2002), la conservation de la biodiversité (Muscatello et al., 2020; Breiner et al., 2021), la gestion des espèces envahissantes (Petsch et al., 2021; Forster et al., 2022), ou encore l'évaluation des impacts du changement climatique (Pearson & Dawson, 2003; Araújo et al., 2005; Drake et al., 2006; Elith & Graham, 2009; Mellert et al., 2011).

Ces modèles permettent de représenter spatialement les niches écologiques, constituant ainsi un outil puissant pour anticiper les dynamiques de répartition des espèces face aux perturbations environnementales ainsi qu'informant les politiques de gestion et orientant les actions de conservation. Toutefois, les SDM se limitent généralement à la *niche réalisée* (Guisan & Zimmermann, 2000), c'est-à-dire à l'aire de répartition observable d'une espèce, considérée comme étant en équilibre avec les conditions environnementales (Guisan & Thuiller, 2005).

Cependant, un des principaux biais des SDM actuels réside dans la forte prédominance accordée aux variables climatiques, au détriment d'autres dimensions écologiques essentielles. En particulier, les facteurs biotiques tels que la compétition interspèce, la prédation, les conditions pédologiques ou encore la disponibilité des habitats sont souvent négligés (Guisan & Zimmermann, 2000; Anderson et al., 2002; Pearson & Dawson, 2003; Hampe, 2004; Austin, 2002). Cette omission des interactions écologiques limite la portée pratique des modèles, notamment pour les applications en planification de la conservation ou en gestion des milieux naturels (Austin, 2002). En cela, les SDM restent des représentations simplifiées de la réalité, mais ils fournissent néanmoins de bonnes approximations des réponses potentielles des espèces face aux changements climatiques (Pearson & Dawson, 2003).

La construction de SDM repose sur un ensemble de méthodes statistiques et d'algorithmes permettant d'ajuster les prédictions aux données disponibles. Ces approches vont des modèles simples comme les modèles linéaires généralisés (GLM) (McCullagh & Nelder, 1989) ou les modèles additifs généralisés (GAM) (Hastie & Tibshirani, 1986; Yee & Mitchell, 1991; Guisan & Zimmermann, 2000) à des techniques plus complexes, telles que les forêts aléatoires (*Random Forest*) (Breiman, 2001). Étant donné que chaque méthode modélise différemment la niche écologique, l'utilisation de plusieurs modèles en parallèle permet d'obtenir une gamme plus large de scénarii possibles, renforçant ainsi la robustesse des projections (Naujokaitis-Lewis et al., 2013).

2.5 MANQUEMENTS DANS LA LITTÉRATURE

Malgré la richesse et la diversité des recherches menées sur l'agriculture de montagne en Suisse, plusieurs lacunes méthodologiques et conceptuelles subsistent. De nombreux travaux ont documenté l'importance historique, sociale et économique de l'agriculture de montagne (Meisser et al., 2013; Rudaz & Debarbieux, 2013; OFAG, 2024a), ainsi que les impacts du changement climatique sur la productivité et la phénologie (OFAG, 2024a). Cependant, ces études n'illustrent pas les différents modes de gestion et la multifonctionnalité des espaces

alpins. Il manque encore des approches véritablement transdisciplinaires, capables de croiser les regards de la géographie, de l'agronomie, de l'écologie et des sciences sociales, et d'intégrer les cadres institutionnels et politiques qui conditionnent les marges de manœuvre des agriculteurs.

Les études spatialisées à une échelle suffisamment précise pour relier la diversité des *codes cultures* et des pratiques agricoles aux gradients climatiques et topographiques locaux, ainsi qu'aux expériences concrètes des agriculteurs, restent rares, voire inexistantes. Ce déficit limite la capacité à identifier des leviers d'adaptation robustes et transférables, adaptés à la diversité des situations alpines. C'est donc à l'interface entre disciplines, et à partir d'une lecture géographique fine et contextualisée, que se trouvent aujourd'hui les principaux leviers d'innovation scientifique et opérationnelle pour l'agriculture de montagne.

Ainsi, afin de combler en partie ces lacunes, ce mémoire adopte une approche multiple mobilisant à la fois des analyses spatiales et statistiques, des modélisations prospectives et des enquêtes de terrain. La méthodologie déployée vise à articuler ces différentes dimensions afin d'offrir une lecture intégrée des dynamiques agricoles de montagne, en tenant compte des contraintes biophysiques, des pratiques agricoles et des cadres institutionnels.

3. MÉTHODOLOGIE, ZONES D'ÉTUDE ET DONNÉES

3.1 APPROCHES UTILISÉES POUR LA RECHERCHE

Cette étude suit une approche en trois temps. La première est une analyse statistique (analyse en composantes principales (ACP) et échelle multidimensionnelle non métrique, en anglais *Non-Metric Multidimensional Scaling* (NMDS) permettant de comparer la tolérance des différentes cultures à résister ou s'adapter à des conditions environnementales variables ainsi que de voir les potentielles différences entre les régions.

La deuxième phase mobilise des modèles de distribution inspirés de l'écologie des espèces pour cartographier les effets potentiels du changement climatique sur les types de cultures. Ces cartes, plus qu'un outil prédictif, servent de support visuel pour la troisième phase et sont les bases sur lesquelles seront fondées les recommandations.

La troisième phase repose sur une analyse qualitative d'entretiens semi-directifs menés auprès des exploitants agricoles. Cette étape permet de saisir les perceptions des agriculteurs face au changement climatique, ainsi que les mesures d'adaptation déjà mises en place ou envisagées.

3.2 ZONES D'ÉTUDE

Cette étude s'appuie sur deux districts emblématiques de la Suisse romande : l'Entremont, situé dans le canton du Valais (VS), et la Gruyère, dans le canton de Fribourg (FR). Le choix de ces zones d'étude reflète la diversité contrastée, qui évolue selon les régions, tant sur les plans géographique, agricole qu'économique. Cela permet d'aborder les différences marquées entre l'Entremont et la Gruyère, tout en capturant les variations progressives des conditions et pratiques agricoles propres à chaque territoire.

Malgré leur proximité géographique (fig. 3), la Gruyère et l'Entremont se distinguent par des contrastes marqués en matière de climat, de superficie, de population, de structure agricole et de développement économique. Ces différences font de ces régions des cas représentatifs de certains enjeux rencontrés dans les zones rurales suisses, sans prétendre couvrir l'ensemble des contextes ruraux du pays. Ces deux régions ont été sélectionnées en raison de leurs différences marquées en termes de climat, d'altitude, de relief, de superficie, de structure agricole et de contexte socio-économique.

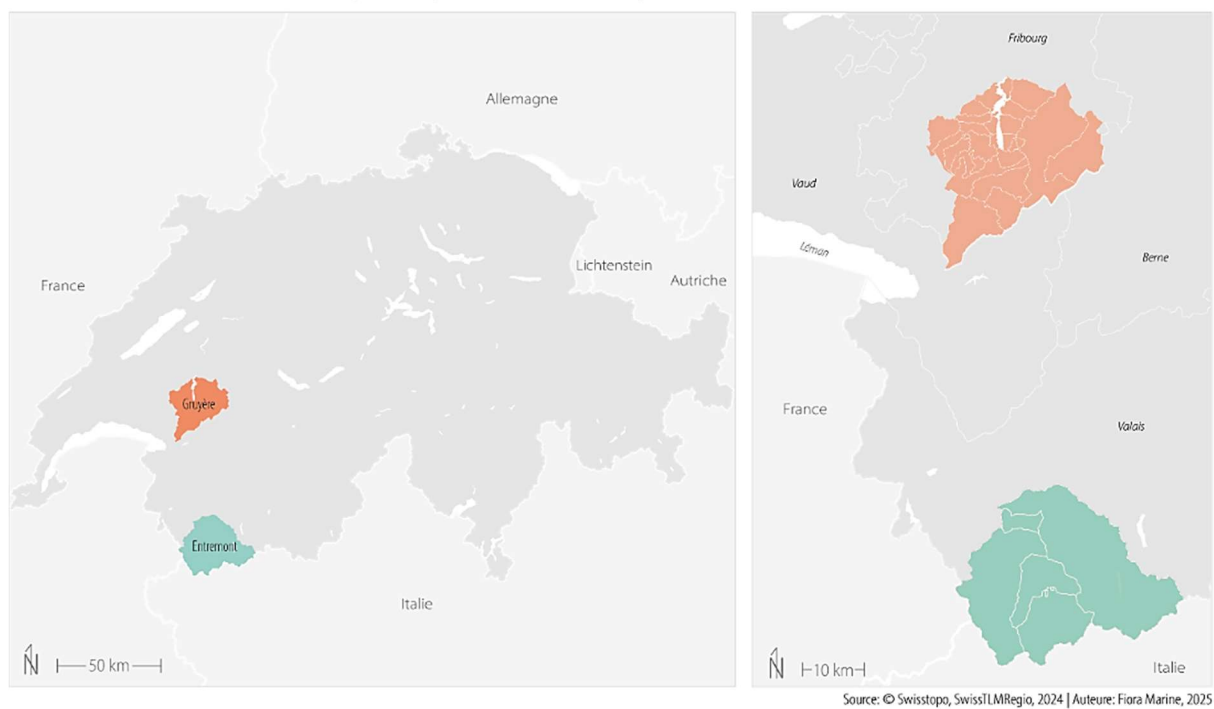


Figure 3 : Localisation des deux différents districts avec les limites cantonales. L'Entremont est en vert et la Gruyère est orange

Les deux régions étudiées comprennent respectivement cinq communes en Entremont et vingt-cinq communes en Gruyère (tab. 5). Par ailleurs, les principales villes et villages situés dans ces deux districts sont représentés sur les figures 4 et 5.

Tableau 5 : Liste des différentes communes composant les districts d'Entremont et de Gruyère.

Entremont	Gruyère		
Bourg-Saint-Pierre	Bas-Intyamont	Grandvillard	Pont-en-Ogoz
Liddes	Botterens	Gruyères	Pont-la-Ville
Orsières	Broc	Haut-Intyamont	Riaz
Sembracher	Bulle	Hauteville	Sâles
Val de Bagnes	Châtel-sur-Montsalvens	Jaun	Sorens
	Corbières	La Roche	Val-de-Charmey
	Crésuz	Le Pâquier	Vaulruz
	Echarlens	Marsens	Vuadens
		Morlon	

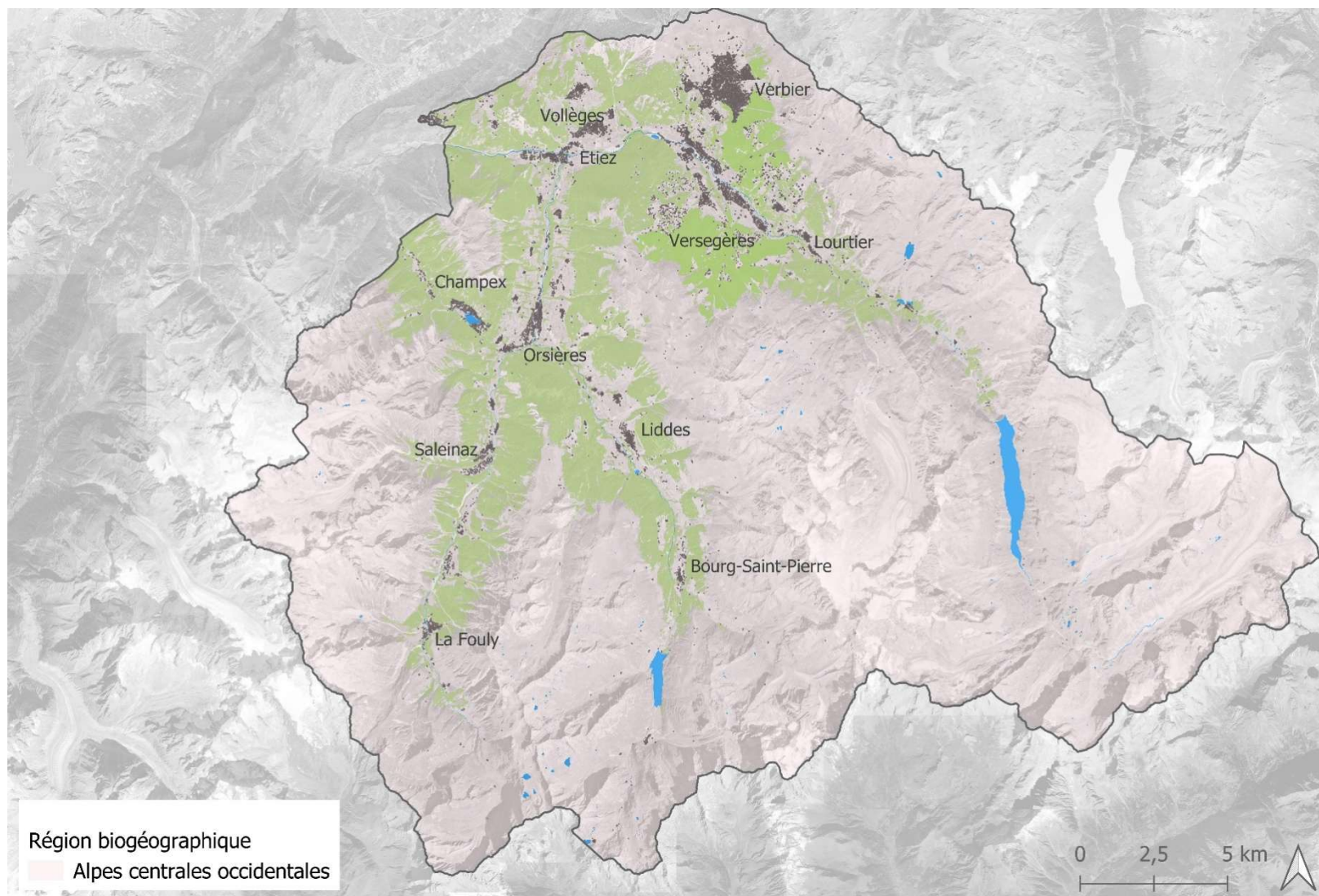


Figure 4 : Principaux villages du district d'Entremont. Les bâtiments se trouvent en noir, les lacs et cours d'eau en bleu et la forêt en vert. (Source des informations : Swisstopo, Swiss Map Vector 25, 2025 ; fond de carte : Esri, 2025)

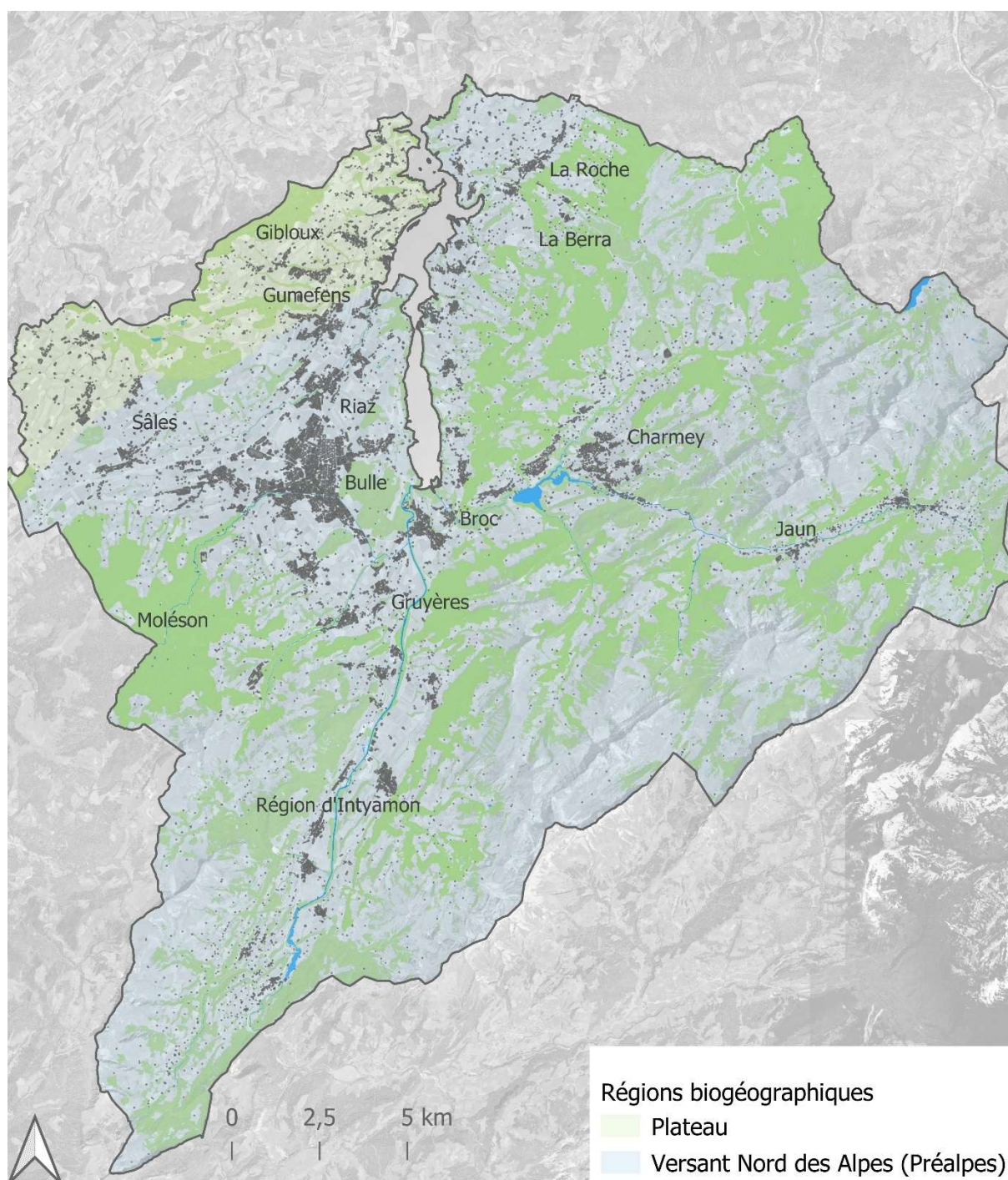


Figure 5: Principaux villages du district de la Gruyère. Les bâtiments se trouvent en noir, les lacs et cours d'eau en bleu et la forêt en vert. (Source des informations : Swisstopo, Swiss Map Vector 25, 2025 ; fond de carte : Esri, 2025)

La Gruyère, située dans les Préalpes avec une partie de son territoire s'inscrivant également sur le plateau suisse, s'étend de 750 m à 2 389 m d'altitude au sommet du Vanil Noir. De plus, les Préalpes constituent l'une des régions les plus humides de Suisse, tant en hiver qu'en été. En période estivale, les nombreux nuages convectifs engendrent des précipitations orageuses intenses, parfois accompagnées de grêle, accentuant de manière importante les précipitations de la région. De plus, ces orages influencent également l'ensoleillement estival, réduit par une nébulosité accrue (NCSS, 2021b).

En comparaison, le district d'Entremont, situé au cœur des Alpes valaisannes, présente une variation d'altitude beaucoup plus marquée, allant de 700 m à 4 314 m, avec le Grand Combin comme point culminant. La topographie escarpée du district et l'axe des vallées nord-sud influencent fortement le climat, notamment par des effets de foehn, qui sont susceptibles d'entraîner une augmentation significative des températures (NCSS, 2021a). Cette topographie entraîne aussi un ensoleillement différencié dans les vallées en fonction de l'orientation des versants (NCSS, 2021a) et elle influence aussi la répartition des précipitations, qui tombent de manière inégale sur le territoire, avec des chutes plus abondantes sur les sommets que dans les vallées. Ces contrastes climatiques se traduisent par des variations significatives en termes de températures, de régimes de précipitations et d'ensoleillement, influençant les écosystèmes dans chaque région.

Les deux districts de la zone d'étude présentent aussi des caractéristiques différentes (tab. 6) :

Tableau 6 : Les principales caractéristiques comparées des districts de la Gruyère et d'Entremont incluent plusieurs dimensions clefs : contexte géographique, démographie, économie et agriculture. Dans ce cadre, la SAU signifie "Surface Agricole Utile", qui désigne l'ensemble des terres effectivement utilisées pour la production agricole, comprenant les terres arables, prairies et pâturages. Les UGB sont les "Unités de Gros Bétail", une unité standardisée permettant de mesurer la charge animale relative à la surface agricole, exprimée ici en nombre d'UGB par hectare de SAU.

Catégories	Gruyère	Entremont
Contexte géographique		
Superficie	489 km ²	633 km ²
Région biogéographique	Plateau et versant nord des Alpes	Alpes centrales occidentales
Surface improductive (2013-2018) (OFS, 2021a)	8 %	59,6 %
Forêt et surfaces boisées (2013-2018) (OFS, 2021b)	37,5 %	20,7 %
Surface agricole (2013-2018) (OFS, 2021c)	48,5 %	17 %.
Démographie		
Nombre d'habitants (2022) (OFS, 2022a)	59 754	15 943
Densité (surface productive) (OFS, 2022b)	132,5 hab./km ²	62,4 hab./km ²
Nombre de communes	25	5
Économie		
Secteur primaire (2022) (OFS, 2022c)	1 243 emplois (5,3 %)	519 emplois (4,1 %)
Secteur secondaire (2022) (OFS, 2022d)	9 852 emplois (39,1 %)	1 998 emplois (24,1 %)
Secteur tertiaire (2022) (OFS, 2022e)	18 411 emplois (55,6 %)	7 096 emplois (71,8 %)
SAU par exploitation (2022) (OFS, 2022f)	30,8 ha	19,6 ha
- Plus de 30 ha - Entre 10 et 30 ha - Moins de 10 ha	48 % 31 % 21 %.	22 %. 38 %. 40 %.
UGB par hectare (2022) (OFS, 2022g)	1,7 UBG/ha	1,2 UBG/ha

Les deux régions présentent également des différences marquées concernant la surface agricole, tant en proportion (avec près de 50% du territoire couvert par des surfaces agricoles

en Gruyère contre moins de 20% dans l'Entremont) qu'en répartition spatiale sur leur territoire respectif.

Dans les deux districts, les surfaces agricoles comprennent les terres arables, les prairies permanentes et les pâturages, incluant les pâturages d'estivage en altitude. Les cultures et prairies permanentes sont majoritairement localisées dans les zones planes et les fonds de vallée, où les conditions pédoclimatiques et la topographie facilitent les pratiques agricoles mécanisées. En revanche, une part importante des pâturages, essentiels à l'élevage extensif, se situe sur des terrains en pente, notamment dans les zones d'altitude élevées utilisées pour le pâturage estival. Plusieurs surfaces agricoles sont localisées en zones d'estivage, caractérisées par une altitude élevée qui conditionne la saisonnalité de leur exploitation. Ces zones, exploitables principalement durant l'été en raison des contraintes climatiques hivernales (neige, froid), sont destinées au pâturage estival du bétail. Cette pratique agricole traditionnelle valorise des herbages naturels riches en altitude, complémentaires aux prairies et cultures des zones basses.

En Entremont (fig. 6), les surfaces agricoles (monocultures et prairies permanentes) sont concentrées dans les vallées, tandis que les zones plus élevées sont majoritairement occupées par des pâturages d'estivage.

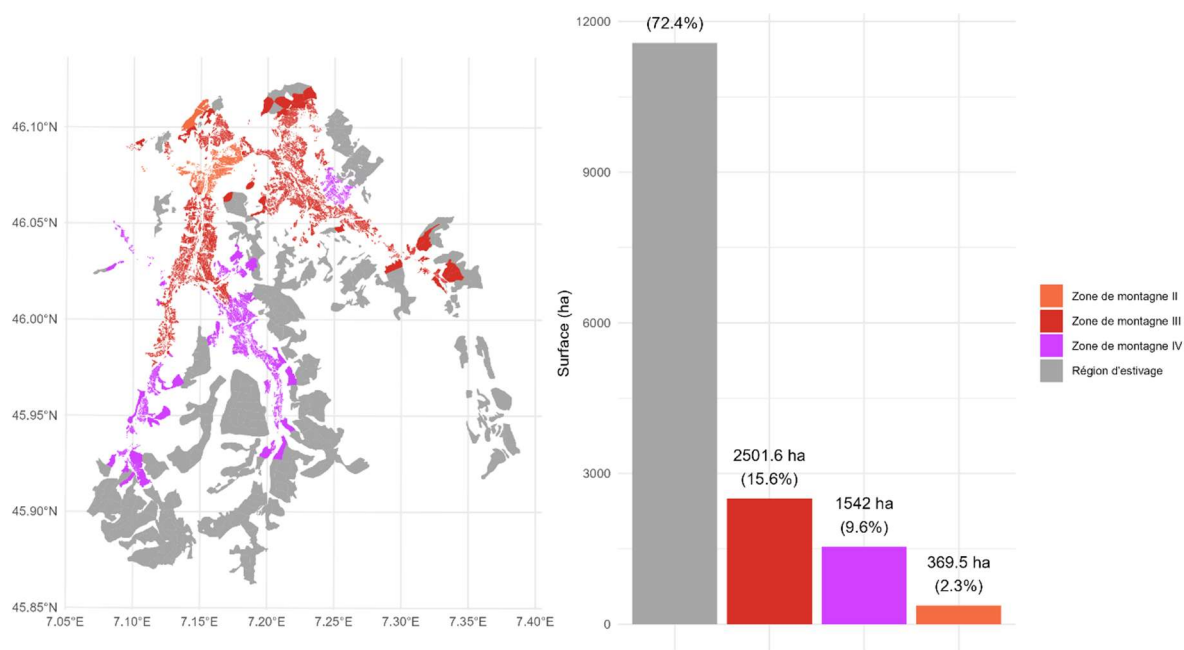


Figure 6 : Répartition et proportions des parcelles agricoles de la SAU de l'Entremont en fonction des différentes zones de montagne (données tirées de Swisstopo, OFAG, 2025).

On observe une forte gradation altitudinale avec une répartition des parcelles dans les zones de montagne II, III et IV. Si globalement, plus une parcelle est éloignée de l'entrée de la vallée, plus son altitude tend à être élevée, ce lien n'est pas systématique. En effet, certains terrains proches de l'entrée, comme ceux de Levron, peuvent se situer à une altitude suffisamment élevée pour être classés en zone de montagne III. Ainsi, c'est avant tout l'altitude qui constitue le facteur déterminant pour intégrer une parcelle à une zone de montagne supérieure. Ainsi, une part considérable des surfaces agricoles appartient à la région d'estivage. En effet, la représentation graphique des surfaces en hectares met en évidence que la région d'estivage couvre la plus grande part du territoire agricole d'Entremont (72,4%), dépassant largement les autres zones de montagne.

En Gruyère, la répartition suit une tendance similaire (fig. 7), avec une concentration des cultures dans les plaines et les pentes douces des zones des collines et des montagnes I, II et III. Toutefois, la Gruyère, caractérisée par une altitude plus basse et des reliefs moins escarpés que l'Entremont, présente une transition plus progressive entre les terrains du Plateau et ceux des Préalpes. Cette topographie plus modérée permet une occupation agricole plus étendue dans les zones de basse et moyenne altitude. Comme en Entremont, les zones périphériques sont majoritairement classées en région d'estivage, bien que la proportion de cette surface soit légèrement inférieure à celle observée en Entremont.

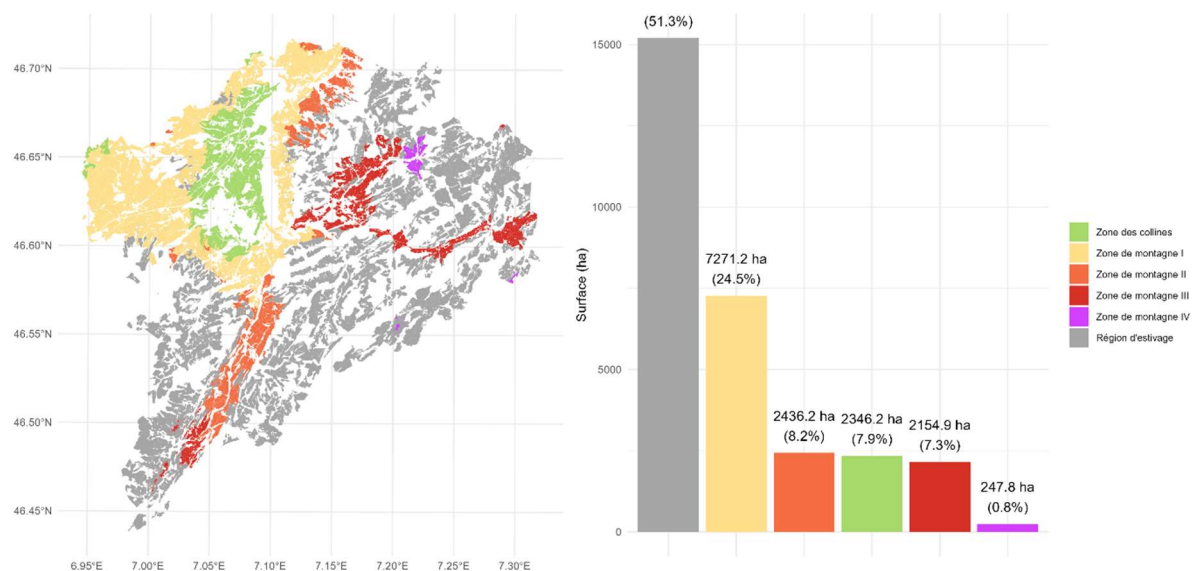


Figure 7 : Répartition et proportions des parcelles agricoles de la SAU de Gruyère en fonction des différentes zones de montagne (données tirées de Swisstopo, OFAG, 2025)

3.3 TYPE DE DONNÉES

3.3.1 Les types de gestion agricole

La répartition des différents *codes cultures* est issue des données officielles fournies par les services cantonaux. Ces informations sont disponibles en libre accès sous forme de couches vectorielles via la plateforme geodienste.ch³², permettant une analyse spatiale fine des surfaces agricoles. L’analyse des statistiques de surface agricole utilisée pour les dix *codes cultures* les plus représentés dans chaque région met en évidence un total de douze *codes cultures* distincts (tab. 7). Ce seuil a été retenu afin de concentrer l’étude sur les pratiques agricoles les plus significatives et représentatives, les autres codes, peu fréquents, étant considérés comme négligeables en termes d’importance statistique et d’impact global sur les systèmes agricoles régionaux. Les *codes cultures* non sélectionnés ont été regroupés sous le code 1000. De plus, les parcelles de prairie sèche (PPS), accessibles via la plateforme geoadmin.ch³³, ont également été intégrées à l’analyse. Elles sont identifiées à part et codées sous le numéro 1, à visée informative et comparative.

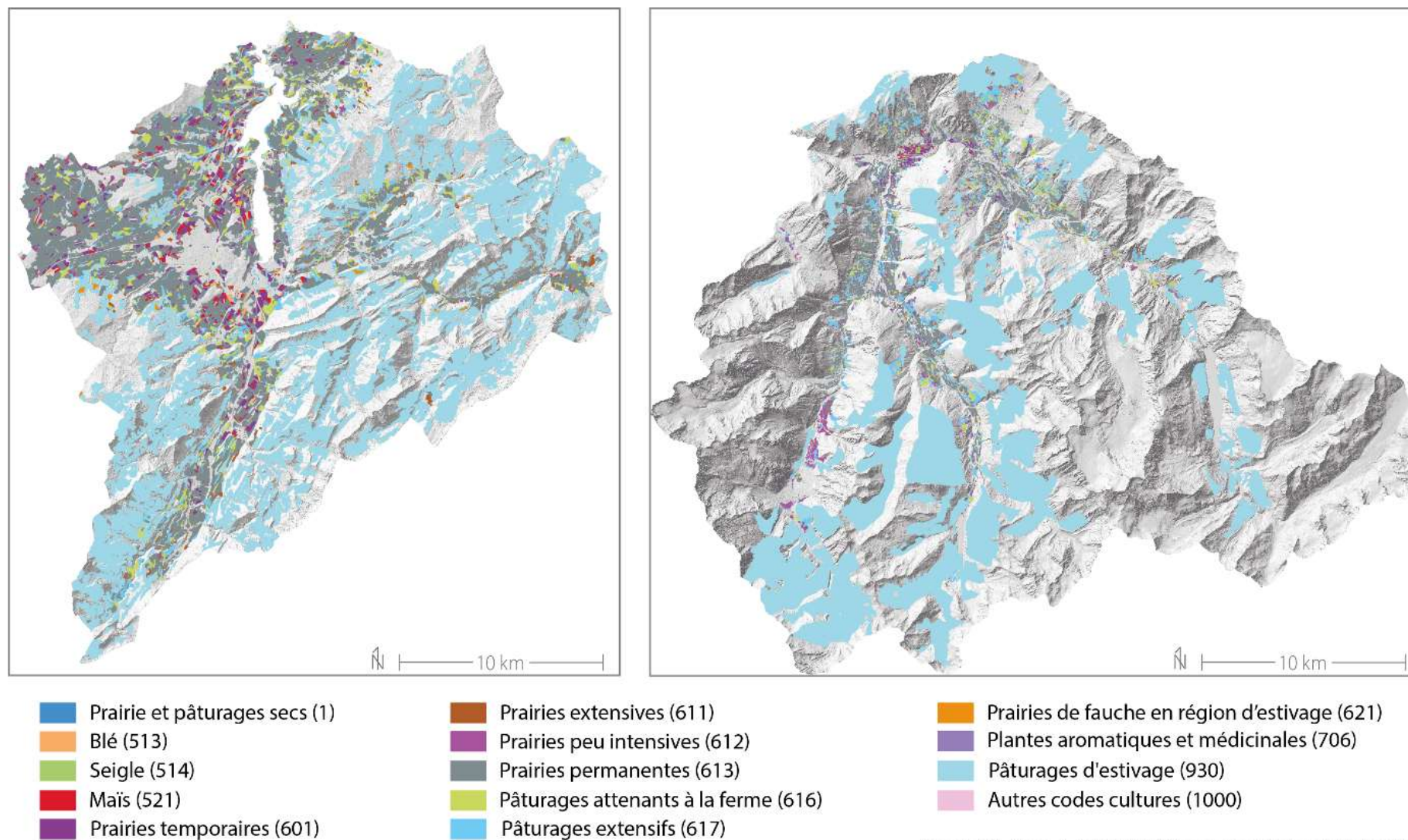
Certains codes cultures se distinguent par leur dominance, en particulier le code 930 (alpages) et le code 613 (prairies permanentes). Leur répartition spatiale met également en évidence les différences de proportion observées sur le territoire (fig. 8).

Tableau 7 : Comparaison de l’utilisation des surfaces agricoles dans les districts d’Entremont et de la Gruyère. Le tableau présente les 10 codes cultures les plus fréquents, classés par ordre décroissant (Source : geodienste.ch, 2024).

Codes culture	Descriptions	Entremont (%)	Gruyère (%)
930	Pâturages d’estivage	79,20 %	52,77 %
613	Prairies permanentes	9,76 %	30,69 %
616	Pâturages attenants à la ferme	2,16 %	4,5 %
601	Prairies temporaires	0,84 %	3,12 %
617	Pâturages extensifs	5,13 %	2,99 %
611	Prairies extensives	0,32 %	1,63 %
612	Prairies peu intensives	2,02 %	1,01 %
521	Maïs	0,08 %	0,90 %
513	Blé	0,04 %	0,45 %
621	Prairies de fauche en région d’estivage	0,03 %	0,35 %
514	Seigle	0,07 %	0,01 %
706	Plantes aromatiques et médicinales	0,11 %	NA

³² Consulté la dernière fois le 08.01.2025

³³ Idem



Sources: © Swisstopo, SwissAlti3D, 2023 ©geodienste.ch, Surface d'utilisation, 2024
Auteure: Fiora Marine, 2024

Figure 8 : Cartographie des différents codes cultures pour le district de la Gruyère (à gauche) et d'Entremont (à droite).

Cependant, la localisation très rapprochée des différentes parcelles sur le territoire ainsi que leur nombre important peuvent créer un biais d'autocorrélation spatiale (Yee & Mitchell, 1991; Araújo et al., 2005; Drake et al., 2006). Afin d'éviter tout biais statistique, les observations ont été sous-échantillonnées, comme conseillé par Guisan et Zimmermann (2000). Ainsi, les parcelles avec plus de 1000 occurrences ont été sous-échantillonnées afin de ne pas avoir plusieurs occurrences à moins de 200 mètres l'une de l'autre. Ce processus de raréfaction spatiale permet de réduire la redondance des parcelles proches géographiquement, souvent soumises à des conditions environnementales similaires, et ainsi d'atténuer les biais potentiels lors des analyses statistiques ultérieures. Les différentes occurrences avant et après épuration des données sont synthétisées au tableau 8.

Tableau 8 : Nombre de parcelles par type de gestion, avant et après l'échantillonnage

<i>Codes culture</i>	<i>Descriptions</i>	<i>Entremont (base)</i>	<i>Entremont (filtré)</i>	<i>Gruyère (base)</i>	<i>Gruyère (filtré)</i>
1	Prairies sèches (PPS)	109	109	160	160
513	Blé d'automne	19	19	56	56
514	Seigle	28	28	1	1
521	Maïs d'ensilage et maïs vert	56	56	157	157
601	Prairies temporaires, sauf pâturages	511	511	450	450
611	Prairies extensives, sauf pâturages	285	285	720	720
612	Prairies peu intensives, sauf pâturages	1611	163	277	277
613	Autres prairies permanentes	8533	428	2861	680
616	Pâturages attenants à la ferme	1516	60	752	752
617	Pâturages extensifs	2622	144	768	768
621	Prairies de fauche en région d'estivage	21	21	54	54
706	Plantes aromatiques et médicinales pluriannuelles	82	82	—	—
930	Pâturages d'estivage	342	342	2647	1336
1000	Autres cultures (code regroupé)	339	339	2715	127
Total		14 575	2587	14938	5538

Cette sélection affinée des données assure une représentativité équilibrée des usages agricoles tout en réduisant les biais liés à la proximité spatiale. Elle constitue ainsi une base solide pour l'analyse des relations entre variables environnementales et répartition des cultures.

3.3.2 Les données climatiques

Plusieurs données climatiques ont été sélectionnées pour cette recherche. La majorité des données vient du jeu de données de CHclim25 de Broennimann & Guisan (2024) mais certaines viennent d'interpolation du MNT25 (MNT25 ; <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/modele-altimetrique-mnt25>). La pertinence des variables environnementales pour une analyse statistique via une réduction dimensionnelle est évaluée à l'aide de l'indice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (Kaiser, 1970). Les variables trop redondantes ont ensuite été retirées afin de limiter la multicollinéarité, ce qui a abouti à une sélection finale de six variables environnementales : indice d'aridité, degrés-jours croissance, température de juillet, humidité, radiation solaire et pente (tab. 9). Ces variables ont déjà été utilisées dans de nombreuses études en région de montagne (par exemple (Engler & Guisan, 2009) et (Dubuis et al., 2012)).

Tableau 9 : Les six variables environnementales utilisées comme variables prédictives dans les modèles

Variables	Unités	Calculs
Degrés-jours >0°C	°C × J × an ⁻¹	Degrés-jours de la saison de croissance (juin à septembre), dérivés des températures mensuelles interpolées au pas de temps journalier et calculés avec un seuil de 0 °C.
Indice d'humidité	mm	Bilan hydrique (P - ETP) de la saison de croissance (juin à septembre), dérivé des températures mensuelles interpolées, des précipitations (P) et du rayonnement solaire global. La formule de Turc ³⁴ est utilisée pour estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP).
Indice d'aridité	Sans unité	L'indice d'aridité est calculé en divisant la somme annuelle des précipitations par l'évapotranspiration potentielle.
Température de juillet	°C	Température mensuelle moyenne de juillet sur la période de référence de 1981-2010
Rayonnement solaire global	kJ × m ⁻² × saison de croissance	Somme du rayonnement solaire global potentiel journalier durant la saison de croissance (juin à septembre).
Pente	Degrés (°)	Inclinaison de la pente dérivée d'un modèle numérique de terrain (MNT) à 25 m de résolution.

³⁴ Selon la formule de Turc : $ETP = P \div \sqrt{0,9 + (P^2 \div L^2)}$, où P est la précipitation (mm) et L le rayonnement global (mm équivalents).

Les différentes données viennent d'horizons différents. Les données de degrés-jours croissance, l'indice d'aridité, les valeurs d'humidité et les températures de juillet proviennent du jeu de données CHclim25 créé par Broennimann et Guisan (2024). CHclim25 est un ensemble de données climatiques à haute résolution spatiale (25 mètres) couvrant l'ensemble de la Suisse. CHclim25 a été produit par un *downscaling* statistique (descente d'échelle) de données climatiques suisses à résolution de 1 km et fournies par MétéoSuisse. L'intégration d'une résolution plus fine permet de mieux capturer les spécificités locales et d'améliorer la précision des prédictions des différents paramètres climatiques à l'échelle locale (Randin et al., 2009a). De plus, les prédictions de CHclim25 ont été comparées aux observations de stations météorologiques indépendantes et les résultats montrent que les erreurs sont minimales par rapport au jeu de données original à 1 km de résolution (Broennimann & Guisan, 2024). Cette approche est particulièrement pertinente dans le cadre de cette recherche, où une précision accrue est essentielle pour évaluer les impacts du changement climatique à l'échelle détaillée des parcelles. Les couches climatiques de ce jeu de données, disponibles au format GeoTIFF, couvrent la période de référence 1981-2010 ainsi que trois périodes futures (2020-2049, 2045-2074, 2070-2099). Elles intègrent également trois scénarii d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5), définis par le GIEC et repris dans les scénarii climatiques suisses CH2018 sous la coordination du NCCS. La radiation solaire globale et la pente du terrain ont été dérivées à partir du modèle numérique de terrain (MNT) à 25 m de résolution de Swisstopo. Ce modèle numérique de terrain est un jeu de données qui décrit la surface terrestre en trois dimensions sans végétation et constructions. Il est conçu essentiellement à partir des informations d'altitude tirées de la Carte nationale au 1:25 000 (CN25).

3.3.3 Les données sur les exploitations

Un ensemble de données relatives aux exploitations agricoles a été recueilli afin de permettre une caractérisation fine des différents profils agricoles présents dans les deux régions étudiées. Ces données ont été obtenues lors de la première partie des entretiens semi-directifs menés auprès de dix agriculteurs, sélectionnés pour représenter une diversité de contextes agricoles (en termes d'altitude, de production, de taille, etc.). Les informations collectées concernent plusieurs dimensions essentielles du fonctionnement des exploitations :

- Le travail : Nombre de personnes impliquées dans l'exploitation.
- Le cheptel : Nombre et type d'animaux élevés (bovins, ovins, caprins, etc.).
- Les surfaces agricoles : Surface totale exploitée, répartition spatiale des parcelles, et proportions des différents *codes cultures* (pâturage, prairie, grandes cultures, etc.).
- Les productions : Types de productions végétales ou animales, orientation commerciale ou autoconsommation, transformation sur place ou vente directe.

Ces données permettent de construire des profils types d'exploitations (tab. 10), selon une typologie inductive fondée sur les réalités exprimées par les agriculteurs eux-mêmes. Cette approche qualitative complète les données quantitatives issues des couches vectorielles et des statistiques agricoles, en offrant une lecture contextualisée et incarnée des pratiques agricoles.

Tableau 10 : Profil des exploitations

	<i>Exploitants</i>	<i>Cheptel</i>	<i>SAU</i>	<i>Productions</i>
	Entremont			
1	2 exploitants avec revenu autre Aide familiale	11 vaches laitières 3 vaches allaitantes 3 chèvres allaitantes	Prairie permanente : 6 ha Autres prairies : 1 ha Pâturage extensif : 5 ha	Vente de lait pour le raclette AOP du Valais Viande
2	1 exploitant 1 employé Aide sur appel	44 vaches laitières 21 têtes de jeune bétail	Prairie permanente : 24 ha Autre prairie : 6 ha Pâturage extensif : 10 ha	Vente de lait pour le raclette AOP du Valais Viande
3	2 exploitants Aide familiale	20 chèvres allaitantes 180 brebis allaitantes 4 ânes	Prairie permanente : 23 ha Pâturage extensif : 25 ha	Production de viande d'agneau bio Vente de laine
4	2 exploitants avec revenu autre Aide entre agriculteurs Aide familiale	35 vaches allaitantes 50 brebis allaitantes 90 chèvres laitières 60 poules 2 ânes 1 cheval	Prairie permanente : 20 ha Pâturage extensif : 20 ha SAU avec 10 ha en PPS	Lait de chèvre pour du fromage de chèvre Vente directe de viande et d'œufs
5	1 exploitant 1 employé 9 mois par an Aide familiale	26 vaches laitières 30 têtes de jeune bétail 5 taureaux	Prairie permanente : 26 ha Autres prairies : 7 ha Pâturage extensif : 3 ha	Vente de lait pour le raclette AOP du Valais Viande

	<i>Exploitants</i>	<i>Cheptel</i>	<i>SAU</i>	<i>Productions</i>
Gruyère				
6	1 exploitant 1 employé Aide familiale	40 vaches laitières 60 têtes de jeune bétail	Prairie permanente : 27 ha Autres prairies : 6 ha Pâturage extensif : 0,5 ha Autres pâturages : 4 ha	Production de lait
7	2 exploitants avec revenu autre Aide familiale	25 vaches laitières 35 têtes de jeune bétail	Maïs : 1 ha Blé : 2 ha Prairie permanente : 10 ha Prairie temporaire : 10 ha Pâturages extensifs : 2 ha	Vente de blé bio, production de lait bio
8	2 exploitants Mandat des particuliers	2000 poules pondeuses bio 13 vaches allaitantes	Terre ouverte : 20 ha Prairie temporaire : 15 ha Prairie intensive : 16,5 ha Pâturage extensif : 3,5 ha	Vente de céréales bio, d'œufs bio.
9	2 exploitants Aide familiale	28 vaches laitières 40 vaches à viande 40 têtes de jeune bétail à viande	Maïs : 3,5 ha Blé : 2,5 ha Prairie temporaire : 3,5 ha Prairie permanente : 29 ha Autres pâturages : 1,5 ha	Lait de fromagerie pour le Gruyère de plaine AOP Production de viande
10	1 exploitant, mais exploitation familiale 1 ouvrier 1 aide sur demande.	60 vaches laitières 150 têtes de jeune bétail 13 cochons 6 chèvres	Maïs : 1 ha Prairie permanente : 39ha	Production de lait de fromagerie pour le Gruyère AOP et le Vacherin fribourgeois AOP (de plaine en hiver, d'alpage en été). Viande de cochon d'alpage.

Des fiches synthétiques illustrées représentent visuellement les exploitations types recensées à travers des symboles et des illustrations permettant de mieux appréhender la diversité des systèmes agricoles (cf. annexe 1).

3.4 OUTILS UTILISÉS

3.4.1 Analyse descriptive

L'analyse des facteurs climatiques en lien avec les différents types de gestion agricole permet de mieux comprendre la répartition des pratiques en fonction des conditions environnementales. Elle met en évidence l'existence de niches climatiques spécifiques associées à chaque *code culture*, ainsi que leurs préférences et tolérances écologiques. Cette étape constitue une base essentielle pour l'interprétation des dynamiques agricoles actuelles et sert de fondement aux modèles climatiques prospectifs développés dans la suite de l'étude.

3.4.1.1 Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales (ACP) permet de condenser les différentes variables climatiques actuelles en dimensions réduites tout en préservant leur variance explicative. Cette technique, dont les fondements mathématiques ont été posés par Pearson (1901) via l'optimisation géométrique des moindres carrés, puis formalisés algébriquement par Hotelling (1933) grâce à la décomposition en valeurs propres, sert ici à caractériser les facteurs environnementaux structurant les parcelles étudiées. En réduisant les six variables environnementales initiales à des composantes principales, l'ACP met en évidence les axes majeurs qui déterminent la niche abiotique des divers *codes cultures*. Cette identification permet de dresser une carte de leur répartition actuelle, de repérer des chevauchements spatiaux ou des frontières écologiques, tout en ordonnant l'impact relatif des facteurs climatiques pour chaque code.

Avant de réaliser l'analyse en composantes principales (ACP) sur les données climatiques des deux régions étudiées (Entremont et Gruyère), l'adéquation des données a été analysée par deux tests standards : le test de Bartlett (Bartlett, 1950) ainsi que l'indice KMO (Kaiser, 1970). On considère que l'ACP est pertinente lorsque le test de Bartlett présente un $p < 0,05$, indiquant ainsi sa signification. Pour le KMO, une valeur supérieure à 0,5 est jugée acceptable pour continuer avec l'ACP ; supérieure à 0,7 est considérée comme bonne, et supérieure à 0,8 comme très bonne.

Quatre ACP distinctes ont été réalisées à l'aide de la librairie « FactoMineR » dans R : une pour la Gruyère, une pour l'Entremont, une pour l'ensemble des deux régions fusionnées et une par *code culture*. Cette approche permet non seulement d'explorer les structures propres à chaque région, mais aussi d'évaluer l'apport d'une analyse globale. L'analyse en composantes principales est réellement une analyse exploratoire pour l'étude, alors l'entièreté des observations a été prise en compte. L'analyse porte sur les dimensions 1-2 et 1-3 afin de tenir compte des trois composantes les plus significatives en termes de variance expliquée. Cela permet de mettre en lumière des variations régionales dans la structuration des niches écologiques, tout en révélant des contraintes partagées à l'échelle suprarégionale.

La validité de cette approche est assurée par le taux élevé de variance cumulée expliqué par les premières composantes, garantissant une bonne représentation des données initiales. De plus, la fiabilité de l'analyse est renforcée par la stabilité des résultats à travers les différentes sous-populations étudiées (Entremont, Gruyère, et ensemble des données), ce qui conforte la robustesse de la méthode et la cohérence des structures écologiques révélées. Additionnellement, une analyse *Outlier Mean Index* a aussi été faite afin de comparer la résilience des différents *codes cultures*.

3.4.1.2 Échelle multidimensionnelle non métrique

Le *Non-Metric Multidimensional Scaling* (NMDS) est une méthode d'ordination non paramétrique spécifiquement destinée à examiner des matrices de dissimilarité entre échantillons, et particulièrement adaptée aux données écologiques telles que l'abondance ou la présence/absence des espèces. Contrairement aux méthodes linéaires comme l'analyse en

composantes principales (ACP), la NMDS permet de conserver les relations non linéaires entre les éléments en s'appuyant sur le classement des distances plutôt que sur leurs valeurs absolues. Cette approche, développée initialement par Kruskal (1964) et largement adoptée en écologie (Clarke, 1993; Kreft & Jetz, 2010), offre ainsi une souplesse accrue face à la complexité et à l'hétérogénéité des jeux de données écologiques.

L'analyse NMDS a été réalisée à l'aide de la fonction MetaMDS du package *vegan* sous R (Oskanen et al., 2008) à partir d'un jeu de données vectoriel d'occurrence des *codes cultures* filtré (tab. 8). La matrice de dissimilarité a été calculée à partir de la distance euclidienne. La qualité de la représentation a été évaluée par le calcul du stress, indicateur de la fidélité de la réduction dimensionnelle, ainsi que par l'inspection du diagramme de Shepard, qui permet de visualiser la correspondance entre les distances originales et celles projetées dans l'espace réduit (Legendre & Legendre, 2012). Un coefficient de détermination élevé ($R^2 > 0,95$) au niveau du diagramme de Shepard a été considéré comme le signe d'une ordination robuste. De plus, un test de Mantel permet aussi de valider la corrélation entre la matrice de dissimilarité originale et les distances issues de l'ordination (Mantel, 1967).

L'interprétation des axes NMDS a ensuite permis d'explorer les regroupements des parcelles et leur relation avec les variables environnementales, conformément aux pratiques recommandées pour l'analyse des communautés écologiques (Clarke, 1993; Kreft & Jetz, 2010). Ce protocole méthodologique, qui combine rigueur statistique et prise en compte des spécificités spatiales, assure la robustesse et la pertinence écologique des résultats obtenus.

3.4.2 Modélisation

La répartition des parcelles sur les deux zones d'étude permet notamment d'illustrer la distribution actuelle des différents *codes cultures*. Cependant, afin d'appréhender les effets du changement climatique sur l'utilisation actuelle du territoire agricole, des modèles de distribution d'espèces (SDM, *Species Distribution Models*) sont calibrés et projetés dans l'Entremont et la Gruyère. Les projections des modèles permettent de visualiser les différentes zones de changement potentiel des *codes cultures* dans l'espace géographique. Contrairement à la majorité des études basées sur des SDM, ce n'est pas la distribution géographique potentielle des espèces qui est modélisée, mais des types de parcelles agricoles.

Plusieurs algorithmes sont ainsi utilisés afin d'obtenir les meilleures projections par un ensemble de modèles. Tout comme dans les recherches de Guisan et al. (1998), de Randin et al. (2009a) ou encore d'Engler et al. (2011), plusieurs modèles ont été utilisés. Les différents algorithmes ont été combinés dans un ensemble afin d'améliorer les projections comme dans l'étude d'Araújo et New (2007).

Les étapes de modélisation sont résumées dans la figure 9. Il s'agit principalement d'une phase de calibration, d'une évaluation et d'une projection.

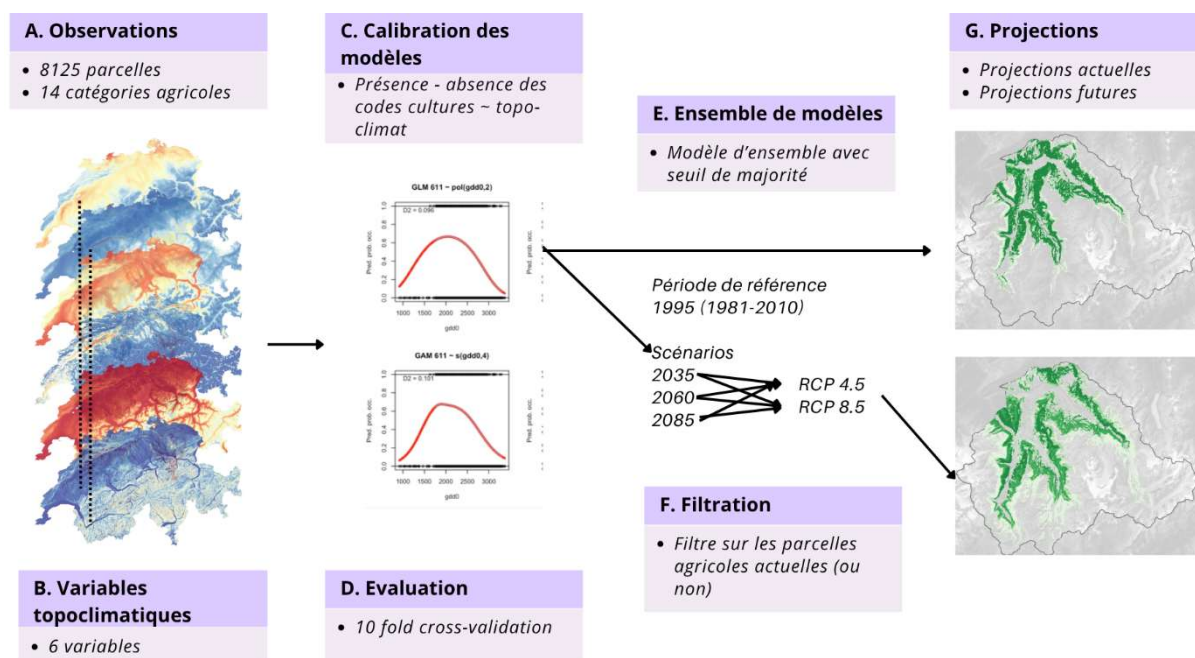


Figure 9 : Étapes de la modélisation des conditions favorables aux différents codes cultures

3.4.2.1 Calibration

Données de calibration

Les données relatives aux types de gestion agricole (cf. chapitre 3.3.1) ont été utilisées à la fois pour délimiter les contours des parcelles et pour catégoriser les différentes formes d'occupation du sol. En les superposant aux données d'occupation du territoire (*codes cultures*), les variables climatiques (cf. chapitre 3.3.2) ont pu être extraites en fonction des types de parcelles identifiés. Ainsi, chaque pixel des jeux de données topo-climatiques s'est vu associé à un usage spécifique. La probabilité de présence d'un *code culture* est alors décelé selon des variables topo-climatiques.

Cependant, afin de limiter les effets d'autocorrélation liés au grand nombre d'observations individuelles, les valeurs climatiques ont été agrégées à l'échelle de la parcelle. Chaque parcelle est ainsi représentée par des valeurs moyennes pour l'ensemble de ses pixels, ce qui permet une interprétation des conditions topo-climatiques associées à chaque type d'usage agricole.

Calibration des modèles et algorithmes de modélisation

Des modèles de distribution des espèces (SDM, *Species distribution Modeling*) reposent sur une relation statistique entre les occurrences (présences et absences) et un ensemble de variables explicatives environnementales, incluant des variables climatiques (par exemple nombre de degrés-jours ou la température) et topographiques (par exemple la radiation solaire ou la pente).

Ainsi, six modèles différents ont été utilisés pour reconstruire la distribution potentielle des espèces : des modèles paramétriques (GLM, *Generalized Linear Models*) avec sélection *stepwise* et GLM avec moyenne de modèles) (Nelder & Wedderburn, 1972), un modèle semi-paramétrique (GAM, *Generalized Additive Model*) avec sélection *stepwise* (Hastie & Tibshirani,

1986) et enfin des modèles d'apprentissage automatique (RF, *Random Forest* (Breiman, 2001), le *gradient boosting machine* (GBM) (Ridgeway, 1999) et le *Maximum Entropy* (MaxEnt) (Phillips et al., 2006)). Les descriptions de chaque modèle sont visibles à l'annexe 2. Pour chaque technique, le modèle est construit de la même manière :

Comme chaque technique présente des avantages et des inconvénients et que les différentes valeurs peuvent varier (Pearson et al., 2006; Elith & Graham, 2009), elles ont été combinées dans un ensemble de modèles pour réduire l'incertitude des prédictions (Pearson et al., 2006), comme le recommandent Araújo & New (2007) et Guisan, Thuiller & Zimmermann (2017). Pour cette étude, le modèle d'ensemble a été interpolé à la majorité : au moins trois des six techniques prédisent une présence potentielle dans un pixel du paysage.

3.4.2.2 Évaluation des modèles

La performance des modèles prédictifs de distribution d'espèces a été évaluée à l'aide d'une validation croisée (10-fold cross-validation (Randin et al., 2006; Cola et al., 2017)). La validation croisée consiste à diviser les données en dix sous-ensembles (ou "folds") de taille équivalente. Le modèle est entraîné sur neuf sous-ensembles, puis testé sur le sous-ensemble restant. Cette opération est répétée 10 fois, en changeant à chaque fois le sous-ensemble de test. Cela permet d'utiliser toutes les données à la fois pour l'entraînement et le test et d'obtenir une évaluation plus robuste et généralisable de la performance du modèle.

Chaque technique pour chaque modèle a été évaluée avec la métrique *True Sensitivity et Specificity* (TSS). Cette métrique, qui prend en compte à la fois les vrais positifs et les vrais négatifs, s'ajuste aux prédictions aléatoires. Il est basé sur une valeur-seuil de classification des prédictions des modèles (souvent choisie pour maximiser la somme sensibilité + spécificité ; max-TSS) (Allouche et al., 2006). Ainsi, le TSS est indépendant de la prévalence (rapport entre présences et absences), ce qui est utile pour les modèles de distribution d'espèces. Le TSS est alors un indicateur de qualité de modèle. Selon Allouche et al. (2006), plus sa valeur est proche de 1, meilleure est la qualité d'ajustement. On considère qu'un TSS > 0,8 indique un modèle excellent ; entre 0,6 et 0,8 il est bon, entre 0,4 et 0,6 il est acceptable, et entre 0,2 et 0,4 il est faible ; en dessous de 0,2, il est considéré comme un échec.

3.4.2.3 Projections des modèles

Les prédictions issues des SDM correspondent initialement à des probabilités d'occurrence comprises entre 0 et 1. Dans le cadre de cette étude, un ensemble de six modèles a été utilisé (*ensemble modelling*), si bien que chaque pixel est associé à un score de 1 à 6 représentant le nombre de modèles prédisant une présence. Cela permet ainsi de visualiser la probabilité d'occurrence d'un certain type de *code culture*.

Pour convertir ces probabilités en prédictions binaires (présence/absence), un seuil de majorité a été appliqué. Tout pixel avec trois prédictions positives ou plus est considéré comme présence. Les cartes finales de présence/absence ont été générées en appliquant ce seuil aux prédictions probabilistes spatialisées. Le même protocole a été suivi pour les données climatiques futures (2035, 2060 et 2085). Le scénario RCP 2.6, peu probable et avec

des changements limités, a été exclu. L'analyse se focalise sur les scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5, jugés plus réalistes et pertinents pour étudier les impacts du changement climatique.

3.4.3 Entretiens semi-directifs

Afin de compléter l'analyse spatiale et de confronter les résultats des modèles de distribution aux réalités du terrain, des entretiens semi-directifs ont été menés auprès d'agriculteurs exploitant des parcelles dans les zones d'étude. Ainsi, dix agriculteurs ont été interviewés au total, répartis équitablement entre les régions (tab. 10), parmi lesquels deux étaient des agricultrices. Les participants étaient majoritairement âgés entre 25 et 40 ans, avec une exception notable d'un agriculteur âgé de 57 ans. De plus, chaque personne interviewée est chef d'exploitation. Cette démarche vise à intégrer la perspective des acteurs de terrain, à mieux comprendre leurs pratiques de gestion et à identifier les leviers et freins à l'adaptation face au changement climatique. L'implication des exploitants agricoles enrichit l'analyse par une dimension pratique, centrée sur la faisabilité des évolutions des *codes cultures* et l'adaptation des pratiques agricoles aux nouvelles contraintes environnementales. Ces rencontres favorisent également l'interdisciplinarité de la recherche, en croisant modélisation spatiale et expertise de terrain, afin d'identifier des solutions d'adaptation réalistes et adaptées aux spécificités locales.

Un guide d'entretien (cf. annexe 3) a permis d'assurer la comparabilité des réponses tout en laissant place à l'expression libre. Les axes principaux abordés sont :

- La présentation de l'exploitation. Les agriculteurs ont commencé par décrire leur exploitation : type de production, taille, altitude, modes de gestion (prairies, pâturages, monocultures, etc.), historique et organisation du travail.
- Les perceptions et impacts actuels du changement climatique. Les participants ont été invités à évoquer les évolutions climatiques qu'ils ont observées au cours des dernières années (sécheresses, précocité des saisons, canicules, etc.) et à décrire les impacts concrets sur leur gestion comme l'adaptation des pratiques, le choix des cultures, la gestion de l'eau, l'évolution des rendements, etc.
- Une analyse partagée des cartes thématiques. Une séquence de l'entretien est consacrée à la présentation et à la discussion de cartes issues des modèles de distribution appliqués aux *codes cultures*. Les agriculteurs ont été invités à commenter la pertinence de ces cartes par rapport à leur expérience, à identifier d'éventuels écarts ou incohérences, et à discuter des possibilités d'adaptation de leur gestion à la lumière des résultats cartographiques.
- Une ouverture sur les perspectives et besoins. En fin d'entretien, les agriculteurs ont pu exprimer leur vision de l'avenir du métier, leurs besoins en matière d'accompagnement ou de formation, ainsi que leurs attentes vis-à-vis des politiques publiques ou de la recherche.

Pour garantir la pertinence de l'analyse, seuls trois types de cultures ont été retenus : les prairies permanentes (code 613), les pâturages extensifs (617) et les pâturages d'estivage

(930). Ces catégories, parmi les plus représentatives et répandues dans la région d'étude, constituent des références partagées par l'ensemble des exploitants interrogés. Les cartes présentées illustraient la perte de conditions favorables pour chacun de ces types de gestion, en comparant la situation actuelle avec les projections pour 2060 selon le scénario climatique RCP 8.5. Ce scénario, le plus pessimiste en matière d'émissions, a été choisi afin de rendre les impacts du changement climatique plus visibles et concrets. L'horizon 2060 a été retenu comme compromis, permettant de présenter des résultats suffisamment différenciés pour être interprétables, tout en restant dans un futur assez proche et pertinent pour les agriculteurs.

Les entretiens, d'une durée moyenne de 60 minutes, se sont déroulés en présentiel, soit sur l'exploitation, soit dans un lieu convenu avec l'agriculteur. Ils ont été enregistrés avec l'accord des participants, puis retranscrits à l'aide d'un logiciel de reconnaissance vocale basé sur l'intelligence artificielle (Vook.ai), afin de faciliter la transcription initiale, puis complétés et corrigés manuellement pour garantir la fidélité et la qualité des contenus. L'ensemble des entretiens a été conduit dans le respect des principes éthiques de la recherche. Les agriculteurs ont été informés des objectifs de l'étude, de la nature des questions posées et de l'utilisation des données recueillies. L'anonymisation des réponses a systématiquement été proposée à ceux qui le souhaitaient, afin de garantir la confidentialité des propos et de respecter la vie privée des participants.

Après la réalisation et l'enregistrement de l'ensemble des entretiens semi-directifs, une relecture attentive et une réécoute minutieuse de tous les enregistrements ont été effectuées afin d'identifier et d'extraire les idées principales ainsi que les axes thématiques majeurs. Cette première étape a permis de construire une base solide des contenus clefs avant d'aborder l'analyse détaillée.

L'analyse des données a ensuite été conduite par thématiques, en examinant les dix entretiens dans leur globalité. Pour faciliter cette étude, un système de codes couleurs a été utilisé, permettant d'identifier clairement les différents thèmes abordés dans les discours des agriculteurs. Le repérage des redondances et des points communs entre les interviews a été facilité par la coloration cohérente des éléments similaires ou convergents.

Parallèlement, des schémas heuristiques (ou cartes mentales) ont été élaborés pour chaque thème principal. Ces cartes ont servi à visualiser et organiser de manière synthétique les idées, les liens entre concepts et les aspects saillants issus des entretiens. Cette double approche a permis de croiser efficacement les informations, en mettant en lumière les recoupements mais aussi les divergences entre les témoignages.

Enfin, une synthèse globale de l'analyse qualitative a été réalisée, intégrant les résultats du codage et des schémas. Des citations représentatives ont été sélectionnées pour illustrer les propos majeurs et assurer la restitution fidèle des points de vue des agriculteurs. Cette synthèse est structurée autour des axes thématiques principaux ressortis de l'étude.

4. RÉSULTATS

4.1 ANALYSE STATISTIQUE

4.1.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de résumer la variabilité des *codes cultures* dans les dimensions climatiques et topographiques de l'Entremont (EN) et de la Gruyère (GR) ainsi que dans un espace géographique commun. Elle permet ainsi de mettre en exergue une spécialisation ou une dépendance de certains codes cultures à des niches environnementales particulières.

4.1.1.1 Entremont

Pour l'Entremont (fig. 10), les deux premiers axes principaux (DIM1 et DIM2) expliquent à eux seuls une part importante de la variance totale. La première dimension (DIM1) joue un rôle prépondérant, expliquant à elle seule 60,5% de la variance. La deuxième dimension (DIM2), quant à elle, représente 25,3% de la variance. Ensemble, ces deux dimensions principales rendent compte de 85,8% de la variabilité observée dans la distribution des *codes cultures*. Ces deux axes synthétisent les gradients topo-climatiques de variation observée *des codes cultures*. L'axe 1 (DIM1) correspond à un gradient thermique, lié en particulier à la température moyenne en juillet, aux degrés-jours de croissance et à la radiation solaire et à la pente. L'axe 2 (DIM2) principalement associé à la topographie, est lié à des facteurs tels que la pente, l'humidité du sol et la radiation solaire. Cette deuxième dimension oppose les parcelles situées sur des terrains plats à celles établies sur des versants plus pentus et exposés. La pente exerce une influence sur les deux dimensions, témoignant de son rôle transversal.

On retrouve un regroupement des cultures telles que le blé (code 513), le seigle (code 514) et le maïs (code 521) dans des zones planes et chaudes. Les prairies temporaires (code 601) partagent une position proche de ces cultures, ce qui suggère une répartition similaire dans des zones caractérisées par une forte radiation solaire, des pentes faibles et des températures élevées. Les plantes aromatiques et médicinales (code 706) se distinguent légèrement, se positionnant dans des conditions plus fraîches, ce qui pourrait indiquer une implantation à une altitude plus élevée. Cependant, les ellipses représentant ces cultures sont restreintes, signalant une niche écologique relativement étroite.

À l'inverse, les prairies et pâturages présentent une niche climatique plus étendue, traduisant leur aptitude à s'adapter à une diversité de conditions climatiques et topographiques, notamment en altitude ou sur des versants plus marqués. Une structuration interne apparaît également entre les différents types de prairies et de pâturages. Les pâturages, comme précédemment observé, sont en moyenne localisés dans des régions plus pentues que les prairies. De plus, les pâturages extensifs (code 617) se retrouvent dans des conditions plus humides que les pâturages attenants à une ferme (code 616), suggérant un positionnement plus élevé en altitude ou dans des zones à microclimat particulier.

Les prairies de fauche en région d'estivage (code 621) se distinguent par une pente plus marquée que les autres prairies. Un gradient thermique net est observable parmi les autres

prairies : les prairies permanentes (code 613) occupent les zones les plus chaudes, tandis que les prairies peu intensives (code 612) et extensives (code 611) se localisent dans des environnements plus frais. Par ailleurs, certaines catégories, telles que les prairies et pâturages secs (code 1), sont fortement corrélées à la pente, indiquant que leur répartition dépend davantage de contraintes topographiques liées à la sécheresse que des conditions thermiques.

Le *code culture* le plus influencé par la température est le code 930, correspondant aux pâturages d'estivage. Ces derniers reflètent bien les conditions spécifiques aux milieux d'altitude, caractérisés par un climat de montagne. Dans les vallées glaciaires du Valais, les alpages se situent principalement à haute altitude, sur des secteurs relativement plats tels que les épaulements glaciaires ou le fond des auges latérales, où la pente est moins prononcée que dans l'auge glaciaire principale située plus bas dans la vallée. Cette configuration géomorphologique particulière explique la forte corrélation observée entre la température et la répartition de ces pâturages, avec une influence topographique plus faible.

Cependant, lorsqu'on examine l'ACP réalisée sur les dimensions 1 et 3 pour la région d'Entremont (fig. 11), on observe que la troisième dimension (DIM3) explique 8,3% de la variance. Cet axe, corrélé aux variables climatiques liées à l'humidité et à la radiation solaire, peut être interprété comme une dimension hydrique. Ceci en fait une dimension tierce par rapport aux DIM1 et DIM2 mais il offre une perspective complémentaire pertinente sur l'organisation des cultures. Bien qu'elle reste secondaire par rapport aux deux premières dimensions, cette part n'est pas négligeable et souligne l'influence complémentaire des facteurs hydriques dans l'organisation des cultures agricoles. Cette représentation confirme ainsi l'effet combiné des variables thermiques (DIM1), majoritaires, et hydriques (DIM3) sur la répartition des *codes cultures*.

Ainsi, un gradient hydrique clair structure la distribution des cultures. On observe notamment que les cultures céréalières, avec le blé (code 513), le seigle (code 514) et le maïs (code 521), sont positionnées dans des zones caractérisées par un indice d'humidité relativement faible. Les plantes aromatiques et médicinales (code 706) apparaissent dans des conditions légèrement moins sèches, ce qui témoigne d'une tolérance accrue à l'humidité.

Les différences deviennent plus nettes en ce qui concerne les prairies. Les prairies permanentes (code 613) se trouvent dans des environnements sensiblement plus secs que les prairies peu intensives (code 612) et les prairies extensives (code 611), ces dernières étant localisées dans des zones beaucoup plus humides, ce qui s'explique essentiellement par une augmentation de l'altitude et des précipitations plus importantes en altitude. En revanche, les pâturages (codes 616, 617) présentent des conditions relativement similaires entre eux, bien qu'ils soient globalement moins humides que les prairies. Cette distinction souligne une certaine homogénéité hydrique au sein des pâturages, tout en confirmant la diversité des niches écologiques des prairies.

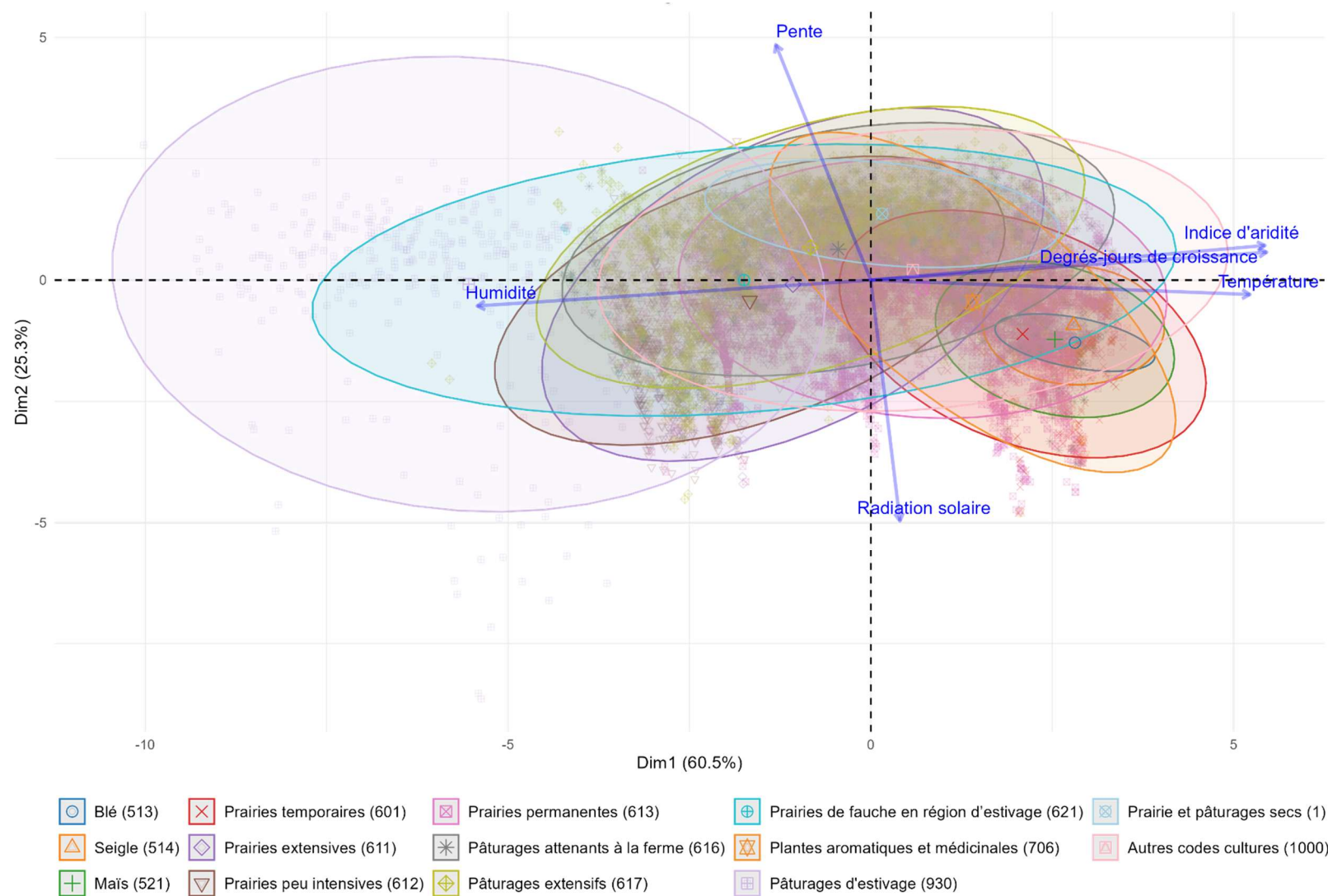


Figure 10 : Analyse en composantes principales des parcelles d'Entremont pour DIM1 et DIM2. Les points représentent les différentes parcelles agricoles, tandis que les ellipses indiquent les niches écologiques correspondant aux conditions abiotiques des parcelles. Les axes représentent quant à eux, les dimensions principales de l'analyse.

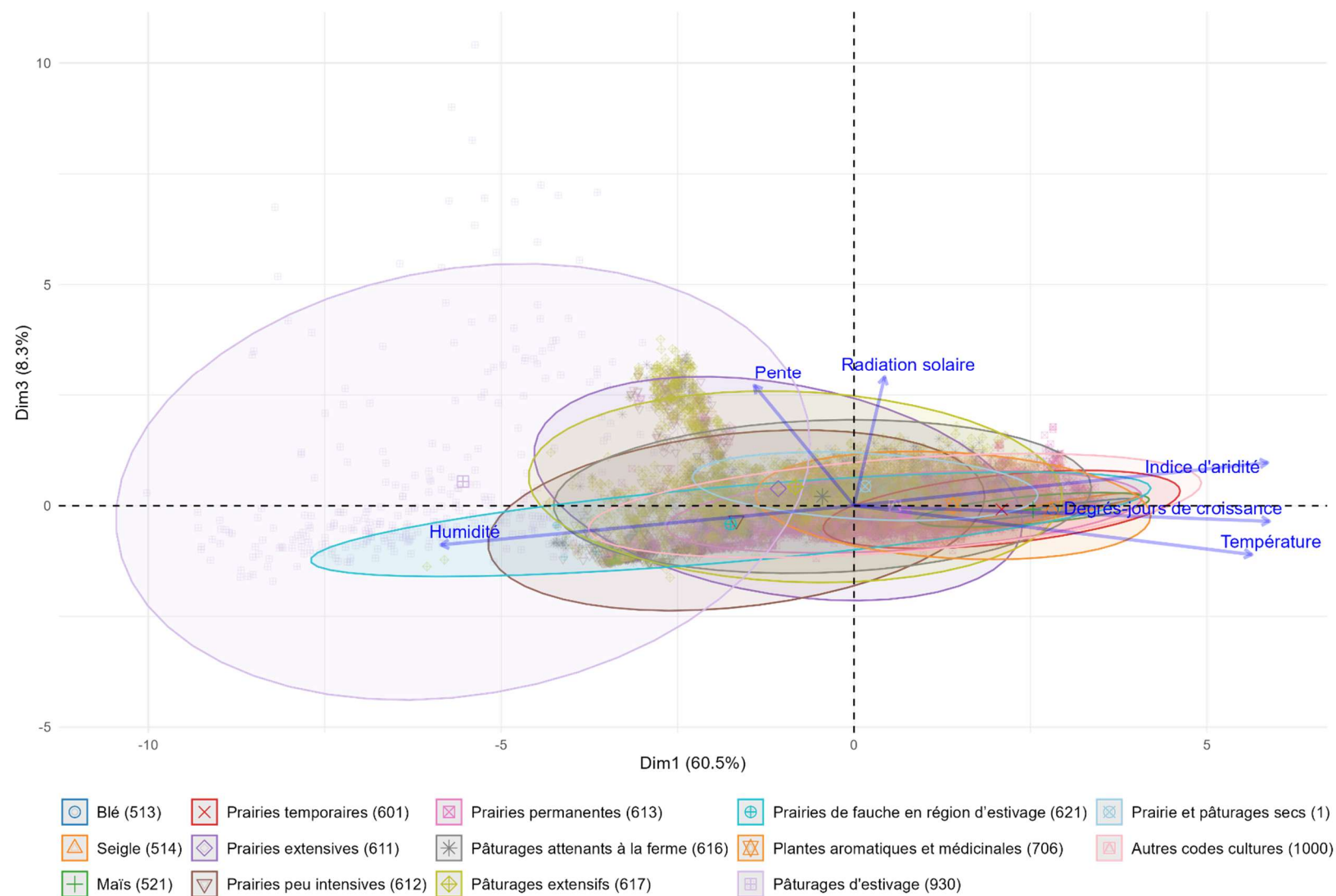


Figure 11 : Analyse en composantes principales des parcelles d'Entremont pour DIM1 et DIM3. Les points représentent les différentes parcelles agricoles, tandis que les ellipses indiquent les niches écologiques correspondant aux conditions abiotiques des parcelles.

4.1.1.2 Gruyère

En ce qui concerne la Gruyère (fig. 12), les deux premiers axes principaux (DIM1 et DIM2) engendrent également une proportion significative de la variance totale cumulée. L'aspect thermique retrouve une place prépondérante, étant responsable de 70,1% de la variance tandis que l'aspect topographique n'en est à l'origine que de 16,4%. Les deux dimensions majeures expliquent 76,5% de la variance. On peut alors observer une tendance similaire à celle d'Entremont, bien que légèrement moins prononcée. Encore une fois, le rôle de la pente se positionne à la frontière des deux axes.

À nouveau, les cultures révèlent une stratification marquée selon la température, et les niches climatiques des différentes parcelles sont relativement similaires au sein de chaque type de culture. Les cultures telles que le blé (code 513), le seigle (code 514), le maïs (code 521) et les prairies temporaires (code 601) se développent dans des conditions chaudes et, sur le terrain, sont généralement implantées sur des surfaces planes. Parmi ces cultures, le seigle (code 514) se distingue par une implantation parfois dans des zones plus sèches et avec une pente plus marquée que les autres cultures.

Dans cette zone, la démarcation entre prairies et pâturages est moins prononcée, ce qui suggère que les différences observées résultent davantage des stratégies d'exploitation agricole que de contraintes écologiques strictes. Toutefois, on remarque que les pâturages extensifs (code 617), les pâturages attenants à la ferme (code 616) et les prairies extensives (code 611) se localisent fréquemment sur des terrains présentant une pente plus prononcée, contrairement aux prairies permanentes (code 613), aux prairies temporaires (code 601) et aux différentes monocultures qui occupent généralement des surfaces plus modérément inclinées. La seule différence notable se situe pour les pâturages d'estivage (code 930). Les pâturages d'estivage se répartissent souvent dans des secteurs d'altitude élevés, où le climat est caractérisé par des températures plus fraîches et une humidité supérieure comparée aux zones plus basses. La pente, quant à elle, influence partiellement la démarcation de ces régions. Cette tendance est également observable pour les prairies et pâturages secs (code 1), qui semblent peu affectés par les facteurs thermiques.

Ainsi, en Gruyère, la répartition des parcelles est principalement régie par les conditions thermiques, avec une influence plus limitée des facteurs topographiques. Les conditions climatiques, en particulier la température de juillet, jouent un rôle majeur dans la distribution des types de cultures et de pâturages, tandis que la topographie a une incidence plus secondaire. L'importance du facteur hydrique dans la région de la Gruyère (fig. 13) est aussi marginale que celle observée en Entremont, avec une part de variance expliquée de seulement 7,4% pour la troisième dimension (DIM3). Ce résultat indique que les conditions hydriques influencent peu la structuration des parcelles agricoles dans cette région, où la température reste le facteur prédominant.

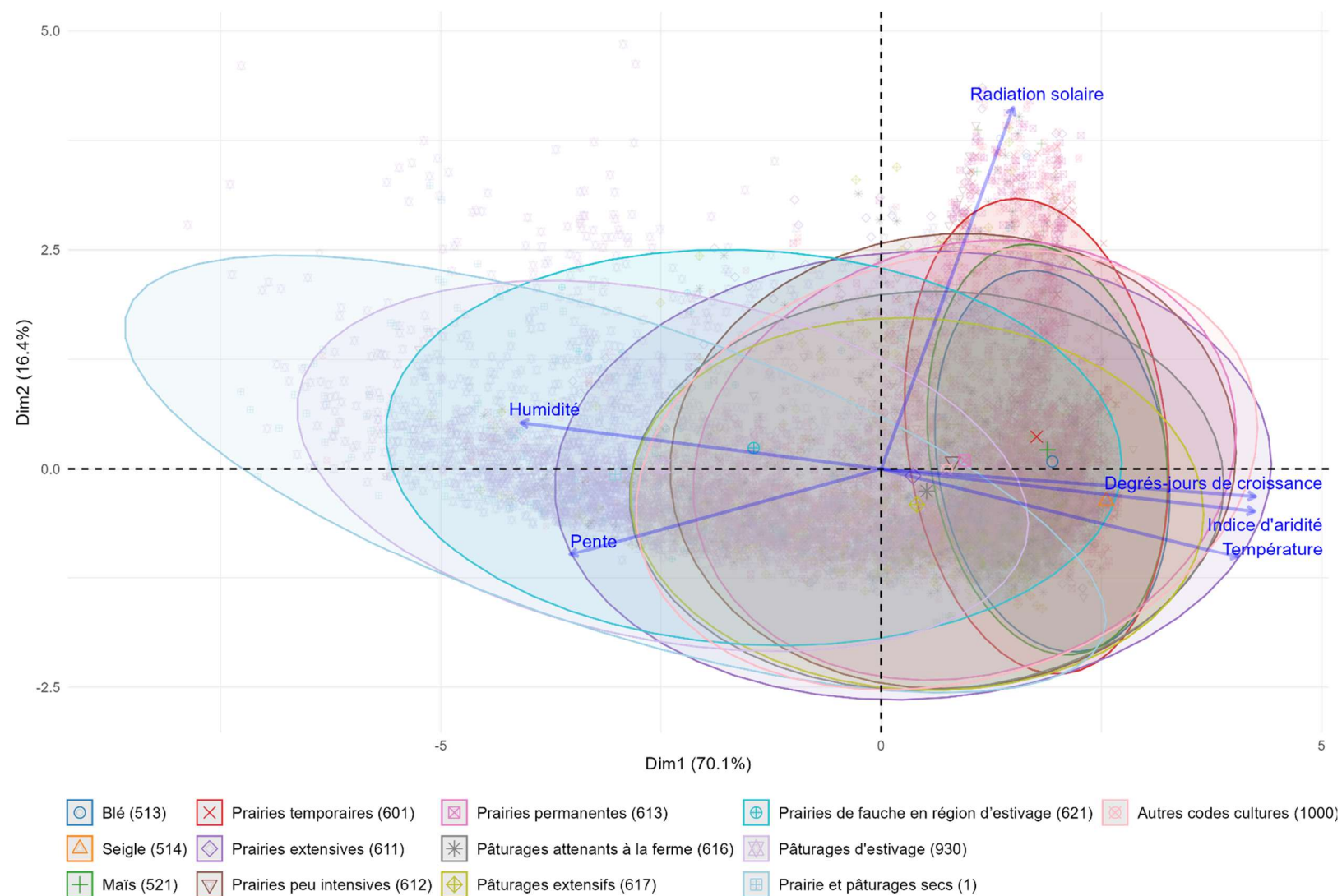


Figure 12: Analyse en composantes principales des parcelles de Gruyère pour DIM1 et DIM2. Les points représentent les différentes parcelles agricoles, tandis que les ellipses indiquent les niches écologiques correspondant aux conditions abiotiques des parcelles.

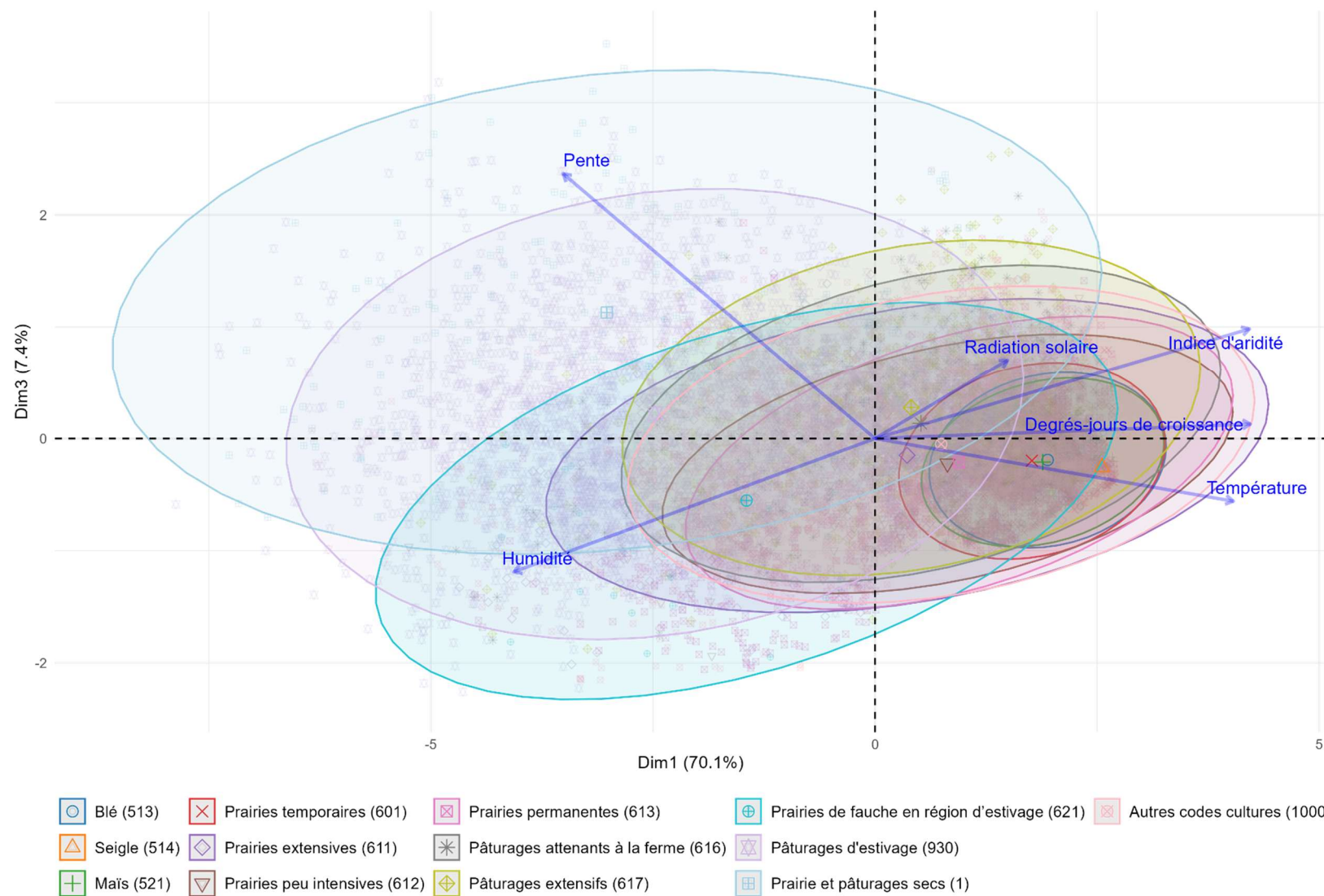


Figure 13: Analyse en composantes principales des parcelles de Gruyère pour DIM1 et DIM3. Les points représentent les différentes parcelles agricoles, tandis que les ellipses indiquent les niches écologiques correspondant aux conditions abiotiques des parcelles.

Contrairement à l'Entremont, la répartition des *codes cultures* dans cette représentation ne révèle pas de gradient hydrique aussi marqué. Les cultures apparaissent relativement homogènes quant à leurs exigences hydriques, traduisant une moindre sensibilité à la sécheresse. La stratification observée semble donc principalement gouvernée par le facteur thermique.

Par ailleurs, les prairies et pâturages présentent des profils environnementaux très similaires, avec peu de différenciation sur l'axe hydrique. Les seules exceptions notables sont les pâturages d'estivage (code 930) et les prairies de fauche en région d'estivage (code 621), qui se situent dans des zones plus humides et pentues. Cette distinction souligne leur appartenance à des milieux de montagne spécifiques, caractérisés par des conditions climatiques plus rigoureuses.

4.1.1.3 ACP sur les codes cultures des deux régions représentées dans le même espace environnemental

L'analyse en composantes principales (ACP) appliquée conjointement aux deux régions produit des résultats nettement moins tranchés que les ACP menées séparément pour chaque zone. En effet, la première ACP réalisée sur les régions fusionnées (fig. 14) illustre ce phénomène : les deux axes principaux (DIM1 et DIM2) n'expliquent que 45,6% et 31,5% de la variance respectivement, soit un total de 77,1% alors que les ACP de l'Entremont et de Gruyère expliquaient respectivement 85,8% et 86,4%. Ce résultat, bien qu'honorable, masque en réalité la diversité et la singularité des dynamiques locales, qui ne peuvent pleinement émerger que dans une approche différenciée et contextualisée.

À nouveau, l'analyse du graphique montre que les *codes cultures* agricoles se distribuent principalement selon un gradient thermique. La topographie, bien que secondaire, demeure un facteur déterminant dans l'explication de leur répartition spatiale. À nouveau, le cluster des cultures (blé, maïs, prairies temporaires) propose des conditions similaires : chaudes et peu pentues. Le seigle (code 514) et les plantes aromatiques et médicinales (code 706) ont une tolérance plus importante à la sécheresse et à la fraîcheur. Il convient toutefois de souligner que le seigle (code 514) n'a qu'une unique occurrence en Gruyère et les plantes aromatiques et médicinales (code 706) n'ont été observées que dans la région de l'Entremont ; par conséquent, l'interprétation de leur positionnement dans l'analyse conjointe doit rester prudente, car leur distribution reflète avant tout des spécificités locales propres à cette région.

Concernant les prairies et pâturages, les mêmes patterns que dans les analyses locales émergent. Les pâturages apparaissent davantage influencés par la topographie que les prairies, principalement pour des raisons d'exploitation, se retrouvant souvent dans des zones plus pentues. On note également des différences internes marquées entre les types de prairies et de pâturages. Par exemple, les ellipses représentant les différentes cultures sont relativement réduites, ce qui indique une niche climatique étroite. En revanche, les codes 612, 613, 616, 617 et 621 (prairies et pâturages diversifiés) affichent une dispersion plus large, reflétant une capacité d'adaptation à une gamme plus vaste de conditions environnementales.

En revanche, les autres types de prairies se répartissent le long d'un gradient altitudinal, avec des températures plus fraîches en altitude. Les prairies permanentes (code 613) se situent dans des zones plus fraîches que les prairies temporaires (code 601), mais également plus sèches, y compris par rapport aux prairies peu intensives (code 612) et extensives (code 611). Cette répartition des prairies extensives reflète en grande partie des contingences d'exploitation agricole, puisqu'elles se trouvent généralement sur des terrains pentus où les usages agricoles plus intensifs sont limités, plutôt qu'une contrainte écologique stricte qui empêcherait leur implantation sur des terrains plats.

Concernant les pâturages, une gradation similaire s'observe, principalement liée à l'altitude et donc à la température. Les pâturages attenants à la ferme (code 616) partagent des conditions topographiques similaires aux prairies temporaires (code 601), mais dans des environnements plus humides. Une progression est également perceptible : les pâturages extensifs se situent dans des zones plus pentues et humides. Enfin, les pâturages d'estivage (code 930) se localisent dans les régions les plus humides, sans nécessairement être les plus pentues. Ils partagent une inclinaison similaire à celle des prairies de fauche en zone d'estivage (code 621), mais à une altitude plus élevée, ce qui se traduit par des températures plus fraîches.

Dans l'ACP centrée sur les dimensions 1 et 3 (fig. 15), la répartition des codes de cultures agricoles s'organise principalement selon la dimension thermique (DIM1), tout en mettant en évidence une structuration notable liée à la dimension hydrique (DIM3). Cette dernière capte une part significative de la variance (11,5%), plus importante que dans les ACP réalisées spécifiquement pour l'Entremont (8,3%) et la Gruyère (7,4%). Cette différence peut s'expliquer par la combinaison des données des deux régions, qui répartit la variance de manière plus équilibrée entre les trois premières dimensions. En effet, l'analyse conjointe tend à diluer la part expliquée par les deux axes principaux, en redistribuant une part non négligeable à la troisième dimension, ce qui diminue la puissance explicative individuelle des deux premières.

Par ailleurs, il convient de souligner que les résultats paraissent moyennés, tant dans l'ACP portant sur les axes 1 et 2 que dans celle fondée sur les axes 1 et 3.

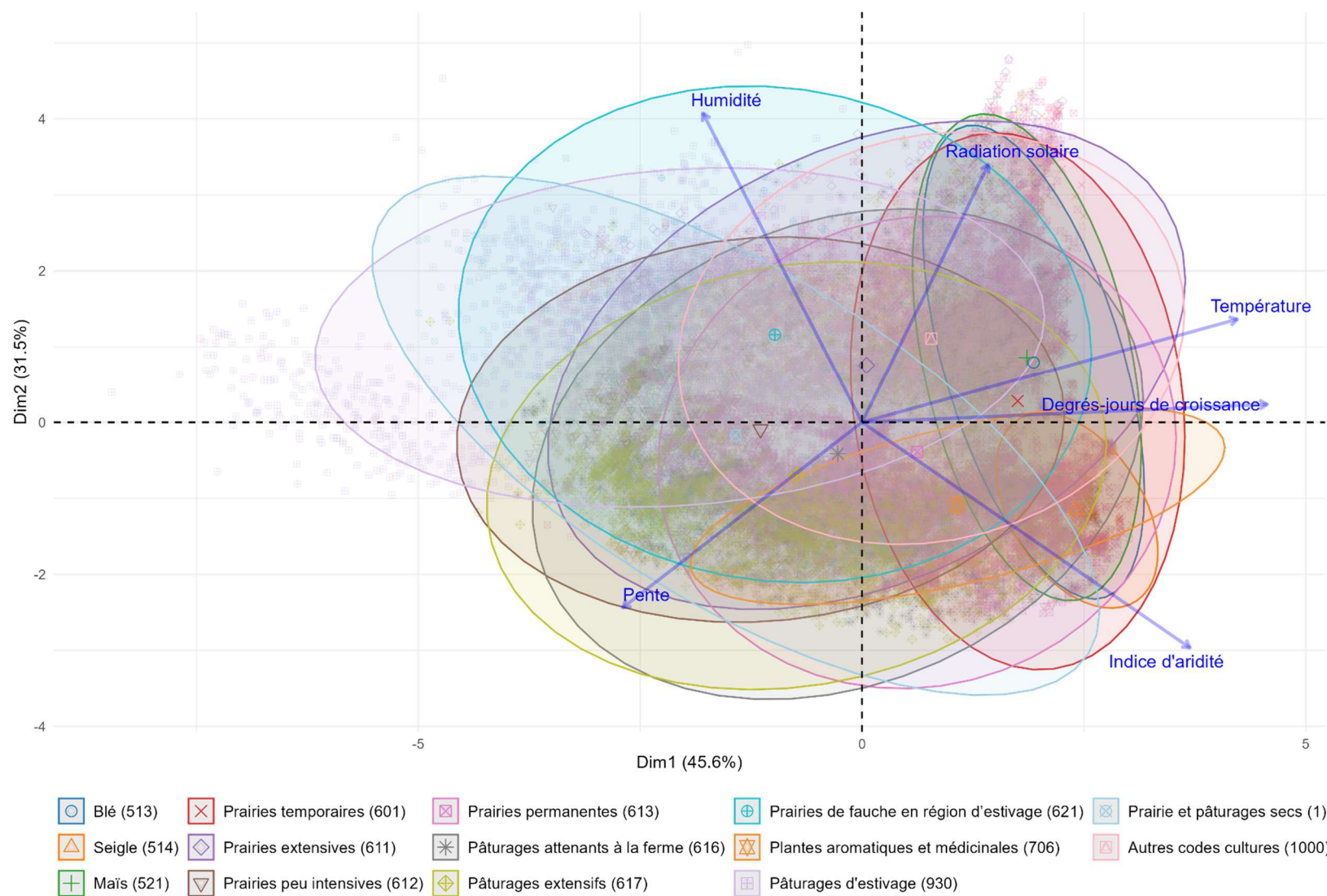


Figure 14: Analyse en composantes principales des parcelles des deux régions fusionnées pour DIM1 et DIM2. Les points représentent les différentes parcelles agricoles, tandis que les ellipses indiquent les niches écologiques correspondant aux conditions abiotique

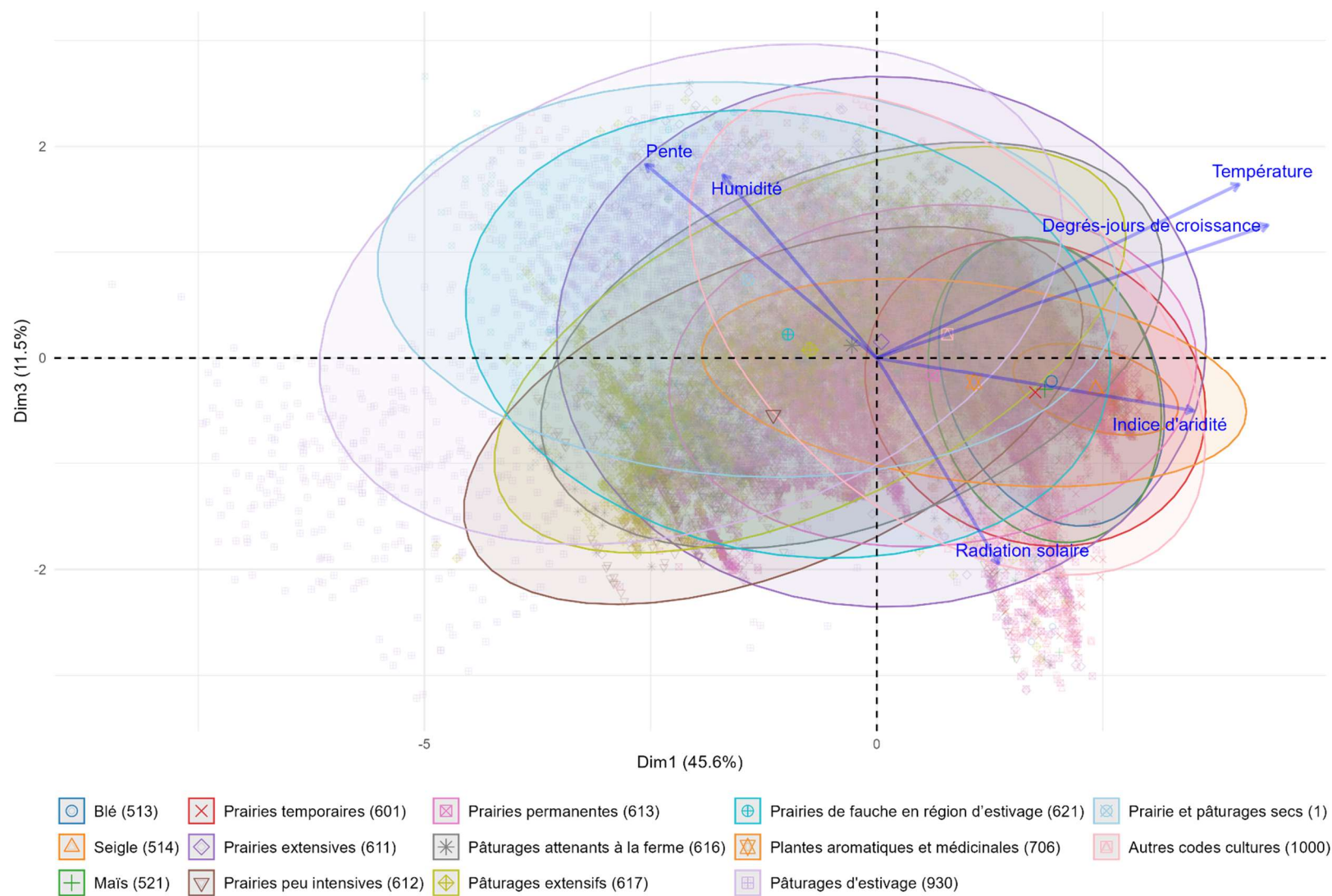


Figure 15: Analyse en composantes principales des parcelles des deux régions fusionnées pour DIM1 et DIM3. Les points représentent les différentes parcelles agricoles, tandis que les ellipses indiquent les niches écologiques correspondant aux conditions abiotiques

4.1.1.4 ACP actuelles par code culture

L'analyse des ACP par *code culture* (fig. 16) montre que le facteur thermique (DIM1) est le principal facteur de discrimination des codes cultures, comme en témoigne l'étirement des ellipses sur l'axe horizontal, notamment pour les alpages (code 930) et les prairies temporaires (code 601). La topographie (DIM2) joue un rôle plus secondaire, mais reste pertinente pour certains codes cultures, comme les pâturages (code 617) et les prairies intensives (code 612), qui se répartissent distinctement sur cet axe.

Certaines cultures, comme les prairies temporaires (code 601) et les prairies extensives (code 611), présentent une niche relativement large, suggérant une tolérance à une diversité de conditions climatiques et topographiques. À l'inverse, des cultures comme le seigle (code 514) et les plantes aromatiques (code 706) se distinguent par des niches écologiques beaucoup plus restreintes, révélant des exigences environnementales spécifiques. Ces deux codes cultures sont d'ailleurs exclusivement présents dans la région d'Entremont. Pour ce qui concerne les prairies de fauche en région d'estivage (code 621), la taille plus réduite de l'ellipse en Gruyère confirme que les conditions environnementales y sont plus homogènes qu'en Entremont.

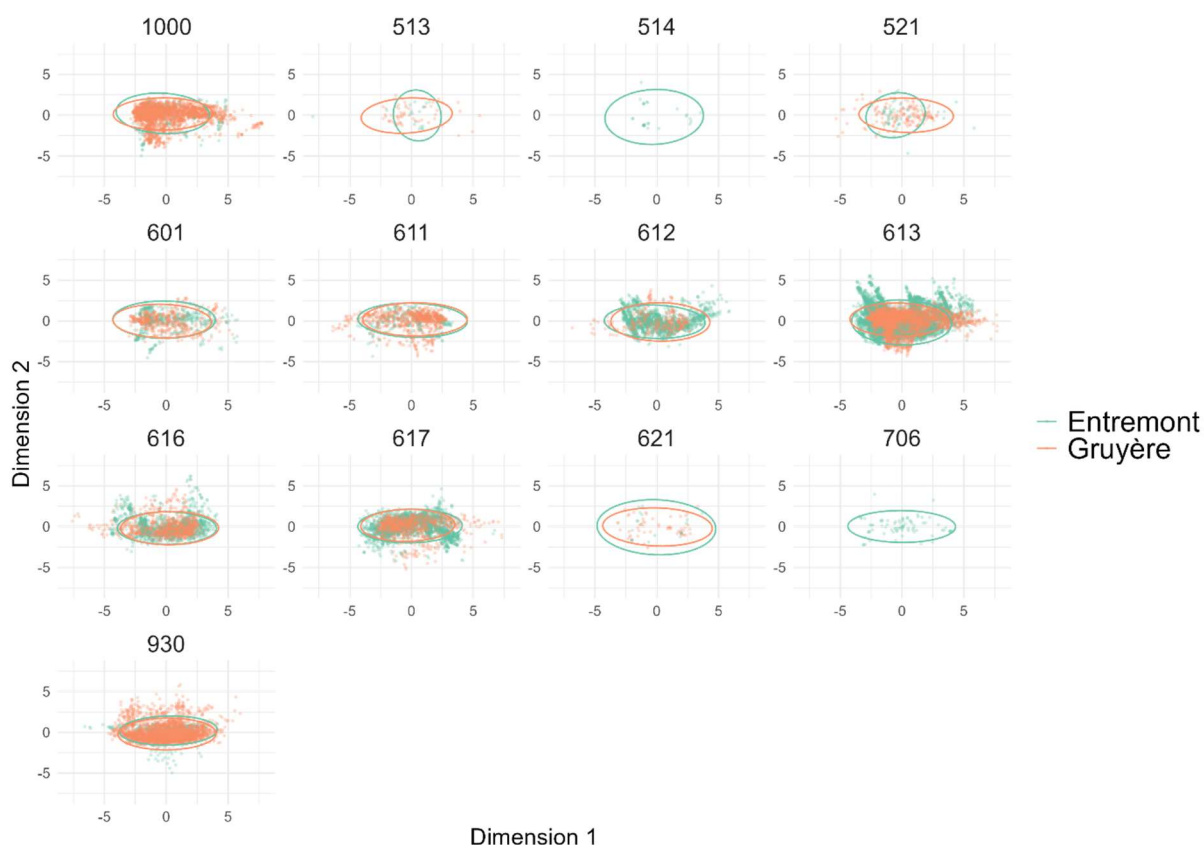


Figure 16: Analyse en composantes principales des dimensions DIM1 et DIM2 par codes cultures selon les différentes régions d'étude. Les différents codes représentent les autres cultures (1000), le blé (513), le seigle (514), le maïs (521), les prairies temporaires (601), les prairies extensives (611), les prairies peu intensives (612), les prairies permanentes (613), les pâturages attenants à la ferme (616), les pâturages extensifs (617), les prairies de fauche en région d'estivage (621), les plantes aromatiques et médicinales (706) et les pâturages d'estivage (930).

Par ailleurs, l'ACP met également en lumière des divergences et des ressemblances régionales pour un même *code culture*. Par exemple, pour les pâturages d'estivage (code 930), les régions diffèrent nettement : les points sont dispersés le long du gradient thermique (DIM1), indiquant des variations importantes selon les conditions climatiques régionales. Les alpages de l'Entremont semblent associés à des conditions plus fraîches (valeurs négatives de DIM1) comparativement à ceux de la Gruyère. Ce phénomène est également visible pour des cultures comme le blé (code 513) et le maïs (code 521), dont les niches écologiques apparaissent beaucoup plus restreintes dans l'Entremont qu'en Gruyère. Cette différence pourrait s'expliquer par des facteurs topographiques : en Entremont, les parcelles planes et chaudes sont moins nombreuses, ce qui limite ces cultures. En revanche, certains codes, tels que les prairies et pâturages sec (code 1), les prairies intensives (code 612) ou les pâturages extensifs (code 617), montrent une répartition relativement uniforme entre les régions. Cela témoigne de conditions similaires entre ces dernières, permettant une implantation plus homogène de ces cultures.

L'analyse des dimensions thermiques et hydriques – DIM1 et DIM3 – (cf. annexe 4) n'est pas concluante et aucun résultat ne peut en être déduit.

4.1.2 Échelle multidimensionnelle non métrique

L'analyse non métrique par échelonnement multidimensionnel (NMDS, *Non-Metric Multidimensional Scaling*) corrobore les résultats obtenus par l'analyse en composantes principales (ACP), révélant une forte convergence entre ces deux approches, respectivement non paramétrique et paramétrique. Cette cohérence méthodologique renforce la robustesse des patrons de distribution dans les gradients topo-climatiques identifiés. Afin d'éviter une redondance inutile et de privilégier la clarté de l'exposé, les résultats de la NMDS sont présentés en annexe 5.

Les résultats détaillés de l'analyse NMDS confirment les grandes tendances observées dans l'ACP. Cependant, bien que corroborant les tendances de l'ACP, la NMDS apporte des nuances importantes : elle offre une visualisation plus fine de l'amplitude écologique des groupes grâce à la forme des ellipses de dispersion, illustre plus explicitement le chevauchement entre les niches écologiques des différentes catégories de prairies et pâturages, et révèle des différences régionales plus subtiles, notamment une variabilité dans les gradients environnementaux moindre en Gruyère qu'en Entremont.

4.1.3 Analyse KMO

L'analyse KMO confirme la perte de spécificité de l'agrégation des deux régions. Bien que les valeurs du test de Bartlett présentent pour les trois analyses une significativité de $p < 0,001$, les valeurs du KMO, prouvent cette perte de spécificité : une hétérogénéité marquante s'observe entre les régions fusionnées et les zones individuelles (tab. 11). La qualité du modèle s'effondre, notamment pour l'humidité qui ne passe même plus la barre des 0.5, rendant l'analyse globale à peine acceptable. Inversement, les valeurs de KMO sont excellentes pour chaque région prise isolément. Cette observation remet en question la robustesse de l'ACP

réalisée sur la région fusionnée. En combinant les données, on dilue le signal spécifique à chaque territoire dans un bruit accru. En analysant chacune des régions indépendamment, l'ACP met en lumière des gradients environnementaux clairs et mieux définis, reflétant les caractéristiques écologiques propres à chaque zone. En revanche, l'analyse combinée brouille ces structures locales, rendant les axes moins interprétables et les tendances globales moins précises.

Tableau 11 : Analyse du KMO pour les deux zones d'études (fusionnées et individuelles) pour chacune des variables topoclimatiques

<i>Variable</i>	<i>KMO total</i>	<i>KMO Entremont</i>	<i>KMO Gruyère</i>
<i>Indice d'aridité</i>	<i>0,52</i>	<i>0,67</i>	<i>0,76</i>
<i>Degrés-jours croissance</i>	<i>0,58</i>	<i>0,74</i>	<i>0,78</i>
<i>Radiation solaire</i>	<i>0,64</i>	<i>0,48</i>	<i>0,44</i>
<i>Température de juillet</i>	<i>0,64</i>	<i>0,74</i>	<i>0,77</i>
<i>Humidité</i>	<i>0,44</i>	<i>0,71</i>	<i>0,78</i>
<i>Pente</i>	<i>0,63</i>	<i>0,53</i>	<i>0,89</i>

Il est intéressant de souligner que les valeurs du KMO Entremont et Gruyère sont en majorité très semblables. Cependant deux valeurs varient fortement : celles de l'aridité et de la pente. Concernant l'aridité, le KMO est inférieur pour l'Entremont (0.67) par rapport à la Gruyère (0.76). Cette différence signifie que le poids du facteur aridité est modifié en Entremont. En effet, l'importance de l'irrigation, qui est une pratique agricole spécifique à cette région, vient en quelque sorte fausser la représentativité écologique de l'aridité. L'irrigation atténue les effets naturels d'aridité, perturbant ainsi les corrélations attendues entre l'aridité et d'autres facteurs climatiques ou topographiques, ce qui diminue la cohérence statistique du modèle global pour cette variable. À l'inverse, en Gruyère, l'absence d'irrigation crée des conditions d'aridité plus uniformes et naturellement liées aux autres facteurs environnementaux, ce qui renforce la structure statistique et augmente la valeur du KMO.

En ce qui concerne la pente, l'écart entre les deux zones est notable aussi, avec un KMO de 0,53 pour Entremont contre 0,89 pour Gruyère. Cette disparité illustre la variation de l'hypsométrie et du relief entre les deux régions. Dans la région de Gruyère, l'inclinaison paraît être un facteur plus structurant, possiblement à cause d'une exploitation agricole du terrain plus variée, qui accentue ses corrélations avec les autres facteurs environnementaux. Dans certaines zones agricoles d'Entremont, la topographie présente une uniformité qui restreint la capacité de la pente à organiser les relations entre les variables.

4.1.4 Indice de résilience des codes cultures

L'analyse de l'*Outlier Mean Index* (OMI) sur le premier axe des ACP (fig. 17) a permis de quantifier la niche environnementale de chaque *code culture* en fonction des gradients topo-climatiques. L'OMI mesure le degré de marginalité d'un groupe (ici, un type de *code culture*) par rapport aux conditions environnementales moyennes de l'ensemble des observations.

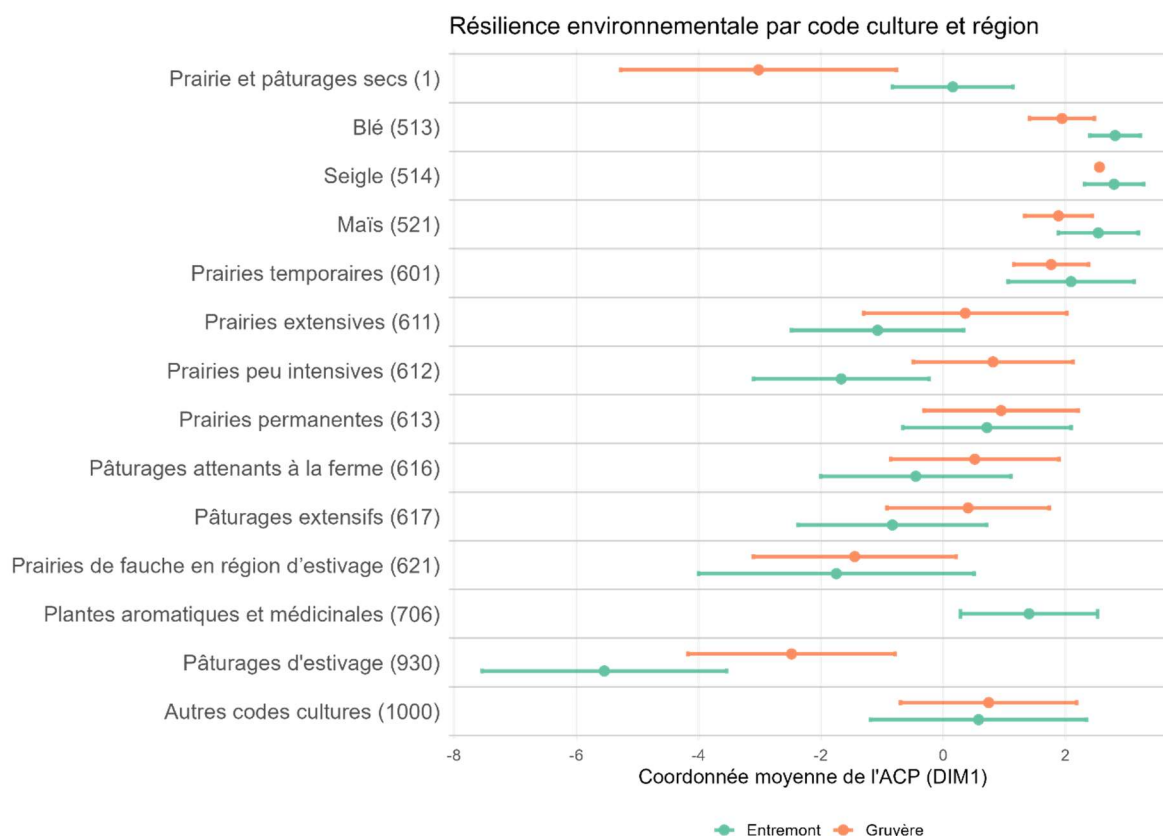


Figure 17 : Résilience environnementale par code culture et par région. Ce graphique compare la résilience environnementale (coordonnée moyenne sur la première dimension analyse en composante principale (ACP)) de chaque culture entre en Entremont et Gruyère. Chaque point représente la moyenne pour une culture dans une région donnée, avec une barre d'erreur correspondant à l'écart-type. Les valeurs négatives indiquent une plus grande résilience écologique alors que les valeurs positives représentent des cultures avec des conditions spécifiques.

Ainsi, un OMI élevé indique qu'un type de culture est principalement présent dans des conditions environnementales marginales ou atypiques par rapport à l'ensemble du gradient, ce qui peut être interprété comme une spécialisation écologique ou une tolérance étroite à certaines conditions. À l'inverse, un OMI négatif suggère que le type de culture est proche du centre de gravité des conditions observées, ce qui reflète une plus grande tolérance ou résilience environnementale.

Pour l'Entremont, les pâturages d'estivage (code 930), les prairies de fauche en région d'estivage (code 621) ainsi que les prairies peu intensives (code 612) présentent des OMI négatifs, indiquant une forte plasticité face aux contraintes topo-climatiques tandis que les cultures de blé (code 513), seigle (code 514), maïs (code 521), plantes aromatiques et médicinales (code 706) et les prairies temporaires (code 601) montrent des OMI positifs, traduisant une spécialisation ou une dépendance à des niches environnementales

particulières. Pour la Gruyère, les pâturages d'estivage (code 930), prairies extensives (code 611) et prairies peu intensives (code 612) se distinguent également par des OMI négatifs, reflétant leur capacité à s'adapter à une large gamme de conditions topo-climatiques. À l'opposé, le blé (code 513), le seigle (code 514), le maïs (code 521) et les prairies temporaires (code 601) affichent des OMI positifs élevés, témoignant d'une moindre plasticité écologique et d'une affinité marquée pour des contextes environnementaux plus restreints.

On note une similitude générale dans le profil de résilience écologique entre les deux régions : tant dans l'Entremont qu'en Gruyère, les prairies naturelles et les pâturages extensifs affichent les OMI les plus négatifs, traduisant ainsi une grande plasticité écologique. En revanche, on observe des OMI plus élevés pour les grandes cultures et les prairies temporaires, ce qui suggère une spécialisation environnementale. Il est à noter que, pour la majorité des *codes cultures*, les indices OMI sont un peu plus élevés en Gruyère qu'en Entremont. Cela indique une inclination vers une plus forte spécificité écologique dans cette zone, avec une plasticité réduite face aux contraintes topo-climatiques.

Ainsi, lorsqu'on observe la résilience des différents *codes cultures* (fig. 18), de nettes différences entre les codes ainsi qu'un gradient sont visible.

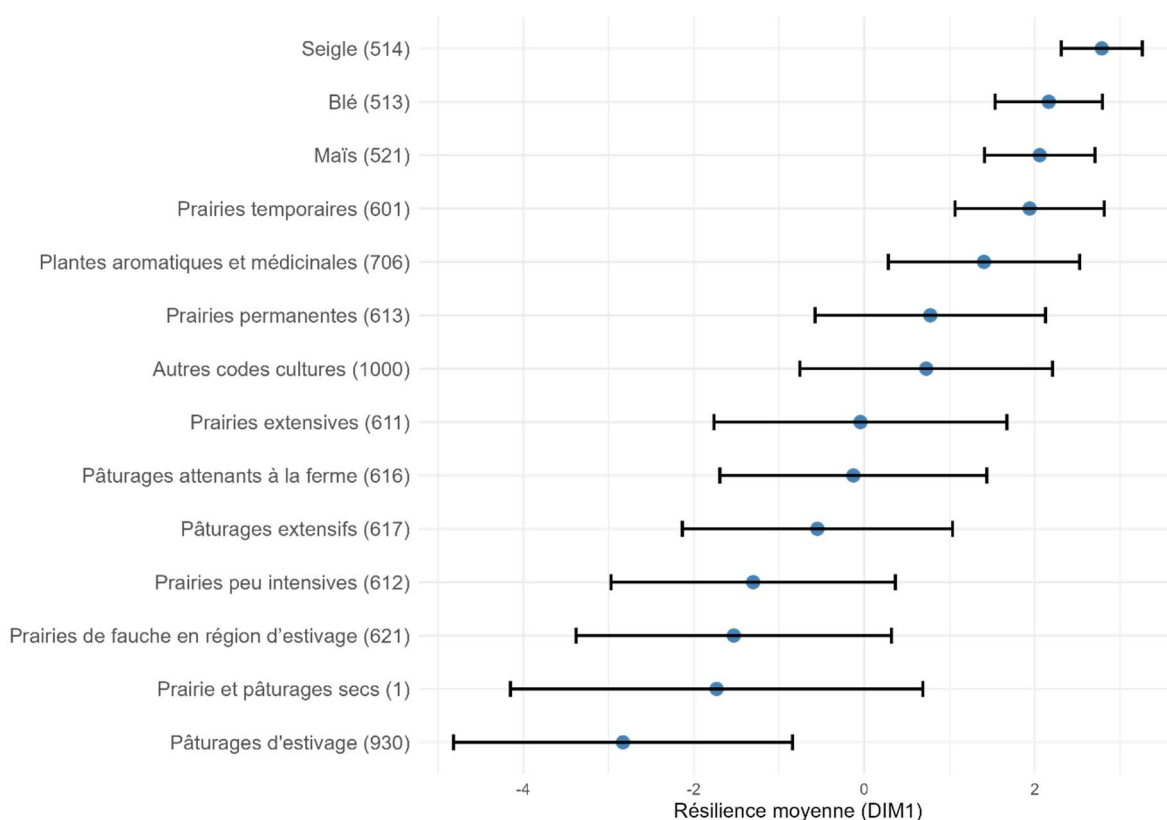


Figure 18 : Classement des codes cultures selon la résilience moyenne. Ce graphique présente la résilience moyenne de chaque code culture, calculée à partir de la première dimension (DIM1) de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Les cercles représentent la moyenne pour chaque code culture, et les traits noirs indiquent l'écart-type. Les valeurs négatives de l'axe correspondent à une plus grande résilience écologique.

Les cultures intensives (comme le seigle (code 514), le blé (code 513), le maïs (code 521) et les prairies temporaires (code 601)) apparaissent généralement du côté supérieur de l'axe de résilience moyenne, ce qui indique une capacité réduite à s'adapter aux fluctuations des conditions environnementales. En revanche, les prairies peu intensives, prairies de fauche en zone d'estivage et pâturages d'estivage présentent les valeurs de résilience négatives. Cela reflète leur grande plasticité écologique et leur capacité à perdurer dans des contextes topoclimatiques plus difficiles ou changeants.

De plus, les systèmes extensifs ont généralement des écarts-types plus élevés, ce qui indique une hétérogénéité interne plus grande, probablement due à la variété des micro-habitats ou des méthodes de gestion. Les prairies permanentes et les pâturages extensifs occupent une place intermédiaire, révélant une résilience modérée, sans pour autant parvenir aux extrêmes observés dans les systèmes les plus naturels ou les plus artificiels.

Pour résumer, ce classement souligne que la robustesse environnementale des terres agricoles diminue avec l'accroissement de l'intensité des pratiques, et qu'elle atteint son apogée dans les systèmes extensifs, plus en phase avec le fonctionnement naturel des écosystèmes de prairies et de pâturages.

4.2 MODÉLISATION DES CONDITIONS FAVORABLES DES *CODES CULTURES*

Les résultats présentés dans ce chapitre reposent sur une analyse spatiale fondée sur les conditions actuelles d'utilisation du sol, ce qui implique une adéquation combinée entre les facteurs topographiques, climatiques, et les pratiques agricoles en place. En effet, la distribution potentielle *des codes cultures* ne découle pas uniquement de conditions écologiques favorables (température, humidité, pente), mais aussi fortement des contraintes liées à l'usage réel du territoire. Ces contraintes intègrent d'autres facteurs tels que la mécanisation des parcelles, les choix économiques des exploitants, ou encore les modalités d'aménagement et de gestion des terrains. Cette distinction est d'autant plus pertinente qu'elle met en évidence que certaines parcelles, bien que bénéficiant de conditions climatiques favorables à la culture, ne sont pas exploitées pour des raisons qui ne sont ni environnementales ni climatiques.

4.2.1 Le blé

La distribution actuelle potentielle du blé en Entremont (fig. 19) se concentre principalement dans les fonds de vallée et les zones faiblement inclinées, telles que les secteurs de Vollèges et d'Etiez, là où les conditions thermiques sont les plus favorables. Cette concentration dans les zones à topographie relativement plane ne résulte pas seulement des conditions écologiques, mais aussi des contraintes d'exploitation agricole. En effet, la mécanisation des cultures céréalières requiert des terrains à faible pente, limitant ainsi la culture du blé sur des versants plus abrupts, même lorsque ces derniers pourraient être climatiquement favorables. Historiquement, certaines parcelles en pente ont été aménagées en terrasses pour permettre la culture du blé, mais cette pratique a largement diminué, et aujourd'hui l'exploitation

intensive privilégie les zones plates. Cette double contrainte, écologique et d'exploitation, conditionne fortement la répartition spatiale actuelle du blé.

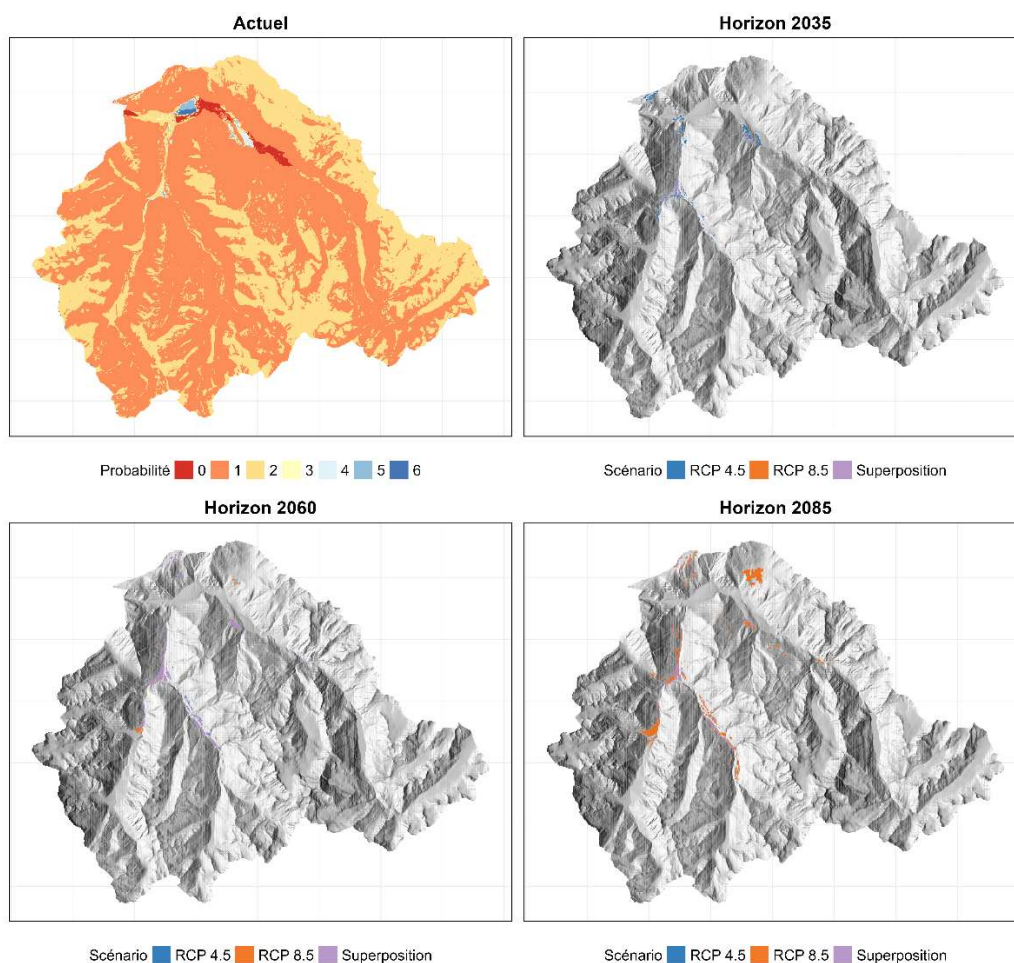


Figure 19 : Distribution des conditions potentielles du blé en Entremont. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence du blé sur le territoire entremontant, avec des valeurs de 0 à 6 correspondants au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence du blé. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables au blé selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP 4.5, en orange pour le scénario RCP 8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables au blé sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

Certaines zones planes situées à des altitudes un peu plus élevées, comme le cône de Versegères ou Orsières présentent également des conditions favorables, mais la topographie reste un facteur limitant clef de l'expansion de cette culture.

Cependant, toutes les régions avec une topographie escarpée, comme les versants des vallées ou avec une altitude trop importante, ne présentent pas les conditions topo-climatiques de prédilection pour le blé. Actuellement, la surface de distribution potentielle du blé dans le territoire entremontain est estimée à 451 ha. Ce chiffre correspond aux surfaces géographiques présentant des conditions écologiques favorables à cette culture, indépendamment de leur usage actuel (cette catégorie est appelée « surfaces non contraintes »).

Cependant, lorsque l'on prend en compte les contraintes liées à l'utilisation législative et administrative du sol, notamment la Loi sur l'aménagement du territoire (LAT) et la

délimitation officielle des zones d'utilisation du sol, la surface réellement disponible pour la culture du blé se réduit à 329 ha³⁵. Ces surfaces « contraintes » excluent en effet les parcelles actuelles affectées à d'autres usages, comme les zones bâties, les forêts ou d'autres fonctions non agricoles. Cette réduction révèle que la localisation privilégiée du blé coïncide souvent avec des usages concurrents de l'espace, en particulier les zones à bâtir.

De plus, en analysant la répartition potentielle des conditions de préférences du blé sur les différents horizons, on remarque que les conditions favorables augmentent en altitude au fur et à mesure des horizons. Les conditions devraient ainsi devenir de plus en plus favorables pour le blé, qui pourra s'étendre dans des régions plus reculées, comme l'entrée des vallées du Val Ferret et du Val d'Entremont, mais aussi sur la région de Verbier. De plus, les différents scénarii climatiques projettent des conditions différentes avec de plus grandes conditions favorables dans le futur, notamment pour le scénario RCP 8.5 à l'horizon 2085 où des régions d'altitude comme Verbier ou le plateau de Saleinaz (Orsières) ainsi que quelques secteurs spécifiques du val d'Entremont (jusqu'à Bourg-Saint-Pierre) deviennent favorables à la culture du blé.

Ces contrats sont relativement proches de ceux trouvés en Gruyère (fig. 20), où la distribution potentielle est particulièrement prononcée dans la région du Plateau, le long du lac de la Gruyère ainsi qu'au centre de la vallée de l'Intyamon, soit à nouveau dans les régions les plus planes et chaudes de la Gruyère. Les régions de montagne, comme la région du Gibloux, du Moléson ou l'Intyamon ou la région de Charmey et Jaun se retrouvent dans des conditions peu propices à la production de blé.

Cependant, la surface potentiellement exploitable pour la culture du blé est limitée par l'utilisation actuelle du sol. En Gruyère, cette contrainte est plus marquée qu'en Entremont : les zones qui auraient pu être dédiées au blé se réduisent considérablement, passant d'un potentiel de 9 047 ha (non contraint) à 7 132 ha (contraint). La concurrence d'usages réduit donc la disponibilité effective des parcelles cultivables, limitant l'extension du blé malgré des conditions écologiques favorables.

Les conditions favorables au blé restent globalement stables dans la région du Plateau. Elles tendent cependant à s'étendre légèrement en altitude, aussi bien dans la région de l'Intyamon que dans celle de Charmey. Cette extension suit la même dynamique altitudinale que celle observée en Entremont. Par ailleurs, les différents scénarii envisagés n'indiquent pas de variations majeures au cours du temps, si ce n'est une légère augmentation de l'altitude favorable au blé dans les zones de Charmey et de la Berra.

³⁵ L'évolution des surfaces contraintes et non contraintes de chaque *code culture* sont disponible en annexe 6.

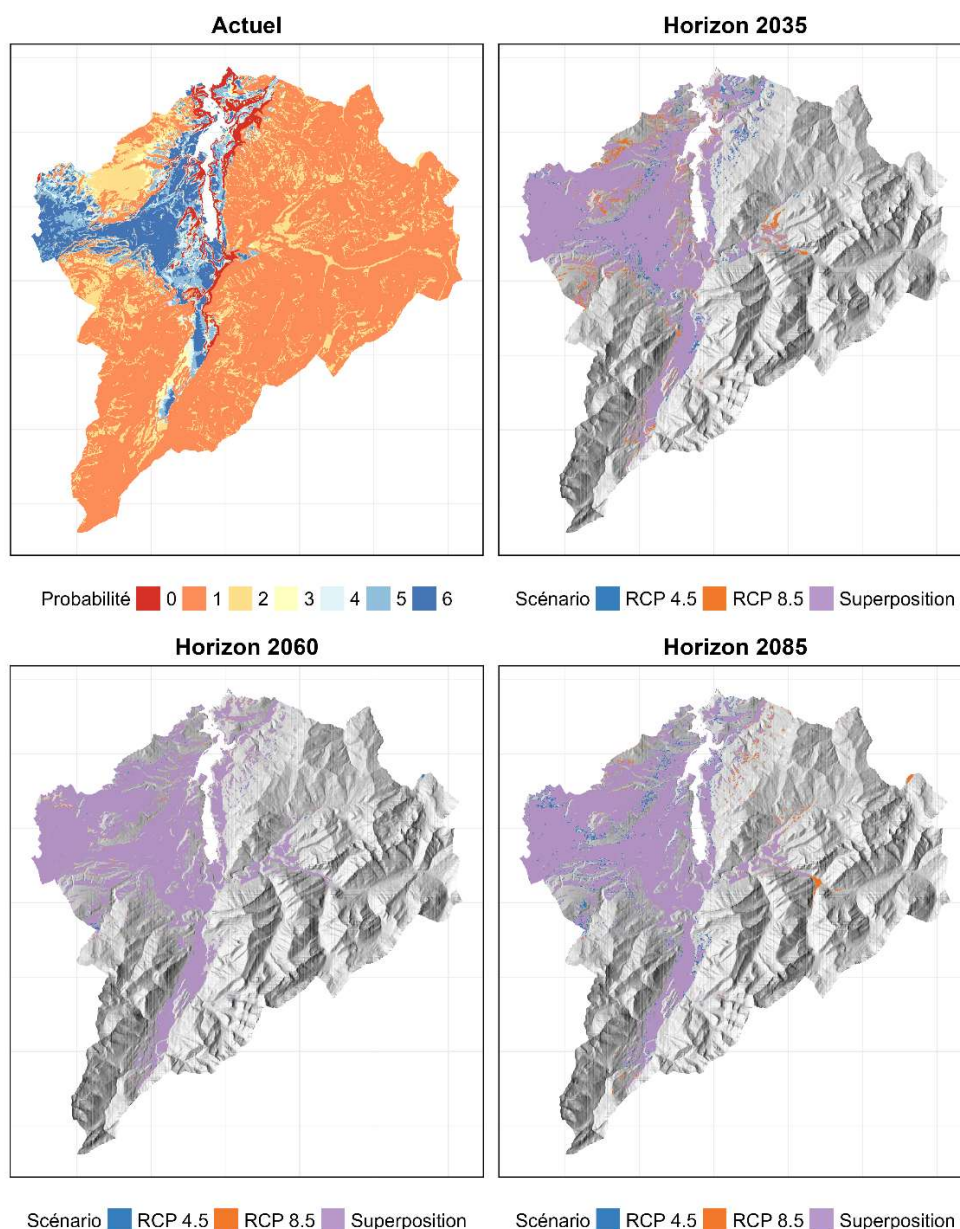


Figure 20 : Distribution des conditions potentielles du blé en Gruyère. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence du blé sur le territoire gruérien, avec des valeurs de 0 à 6 correspondants au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence du blé. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables au blé selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP 4.5, en orange pour le scénario RCP 8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables au blé sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

Les conditions favorables au blé restent globalement stables dans la région du Plateau. Elles tendent cependant à s'étendre légèrement en altitude, aussi bien dans la région de l'Intyamon que dans celle de Charmey. Cette extension suit la même dynamique altitudinale que celle observée en Entremont. Par ailleurs, les différents scénarii envisagés n'indiquent pas de variations majeures au cours du temps, si ce n'est une légère augmentation de l'altitude favorable au blé dans les zones de Charmey et de la Berra.

Ainsi, l'évolution des zones favorables par rapport à la situation actuelle (tab. 12³⁶) présente des dynamiques contrastées entre les deux régions.

Tableau 12: Évolution des conditions favorables pour le blé en pourcentage par rapport à la situation actuelle

	<i>Blé</i>							
	<i>Entremont</i>				<i>Gruyère</i>			
	<i>RCP 4.5</i>		<i>RCP8.5</i>		<i>RCP 4.5</i>		<i>RCP8.5</i>	
	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>
2035	32 %	34 %	−49 %	−50 %	28 %	25 %	36 %	32 %
2060	38 %	38 %	74 %	76 %	38 %	35 %	37 %	33 %
2085	−14 %	−12 %	264 %	250 %	35 %	32 %	33 %	29 %

En Entremont, les surfaces favorables à la culture du blé varient fortement selon les horizons temporels et les scénarii climatiques. À court terme (2035), les projections sont contradictoires : sous le scénario RCP 4.5, une légère augmentation est prévue (+32% à +34%), tandis que le scénario RCP 8.5 projette une nette diminution (−49% à −50%) des surfaces favorables. Cette tendance s'inverse complètement dès 2060, où les deux scénarii projettent une hausse marquée, particulièrement sous le scénario RCP 8.5 (+74% à +76%). À l'horizon 2085, le contraste entre les scénarii devient saisissant : les surfaces favorables diminuent sous le scénario RCP 4.5 (−14% à −12%) mais explosent sous le scénario RCP 8.5, avec une augmentation spectaculaire de +250% à +264%. Cela traduit une forte sensibilité de l'Entremont aux changements climatiques, avec un basculement potentiel vers des conditions très favorables dans un contexte de réchauffement marqué. Cette diminution sous le scénario RCP 4.5 s'explique principalement par le fait que l'augmentation modérée de la température ne suffit pas à compenser la dégradation des conditions dans le fond de la vallée, où il devient trop chaud ou sec pour le blé, sans que l'altitude plus élevée n'offre encore des conditions vraiment favorables. En revanche, sous le scénario RCP 8.5, le réchauffement plus marqué permet au blé de s'étendre en altitude, compensant largement la perte des surfaces de basse altitude et conduisant ainsi à une augmentation globale des surfaces favorables.

Cependant, il convient de souligner que ces valeurs extrêmes doivent être interprétées avec prudence. Elles résultent en partie d'un artefact du modèle, lié à une courbe de réponse tronquée, notamment pour la variable hydrique³⁷ (cf. annexe 8). Ce phénomène est probablement accentué par le faible nombre de données disponibles pour les céréales dans la région, ce qui limite la fiabilité des projections les plus extrêmes. Ainsi, bien que le modèle suggère une extension importante des surfaces favorables dans les scénarii sévères, il est

³⁶ Les différentes valeurs pour les autres codes cultures montent aussi ces résultats et peuvent être consultés à l'annexe 7.

³⁷ Cet artefact est présent sur toutes les courbes de cultures : blé, maïs, seigle, prairies temporaires et herbes médicinales.

probable que l'ampleur réelle de cette augmentation soit surestimée. Malgré ces limitations, la tendance générale à une augmentation des surfaces favorables en contexte de réchauffement importante demeure robuste, même si les valeurs absolues doivent être considérées comme indicatives plutôt que prédictives.

En comparaison, la Gruyère présente une évolution beaucoup plus stable. Les gains de surfaces favorables sont modérés mais constants, oscillant autour de +25% à +38% selon les scénarii et les horizons, sans différences majeures entre les scénarii RCP4.5 et RCP8.5. Cette stabilité reflète une topographie moins hétérogène et un positionnement favorable du territoire par rapport aux exigences climatiques du blé. En revanche, les contraintes liées à l'utilisation actuelle du sol y jouent un rôle plus restrictif que dans l'Entremont, comme en témoigne la réduction importante des surfaces cultivables une fois les limitations administratives prises en compte.

En somme, l'Entremont pourrait connaître une transformation plus radicale de ses conditions agro-climatiques, avec une opportunité d'expansion du blé en altitude sous des scénarii de réchauffement élevé, tandis que la Gruyère bénéficierait d'une progression plus modérée, mais sur des bases plus stables.

4.2.2 Les prairies permanentes

En Entremont, les prairies permanentes sont présentes notamment dans les fonds de vallée (Saleinaz, Liddes, Lourtier) (fig. 21). Elles se situent assez proches des conditions du blé, mais avec une plasticité plus importante, notamment avec des conditions plus fraîches, puisqu'elles se situent non seulement plus haut dans les vallées alpines, mais aussi légèrement sur les versants des vallées. Bien que ce *code culture* présente une plus grande souplesse écologique que le blé, sa distribution est limitée par des topographies difficiles, car la mécanisation des parcelles agricoles, indispensable pour leur exploitation, est moins adaptée dans ces zones à fort relief. Cette contrainte liée à l'exploitation physique des parcelles restreint donc la surface effectivement cultivable.

Les prairies permanentes montrent une souplesse plus importante que le blé, mais relativement restreinte, puisqu'elles ne sont cependant pas favorables dans des topographies importantes, restreignant sa distribution sur le territoire. Ceci étant dit, comme pour le blé à un facteur important au niveau de l'exploitation, notamment au niveau de la mécanisation des différentes parcelles agricoles. Ainsi, les conditions propices pour les prairies permanentes sont celles des creux de vallées, relativement plats et assez bas en altitude. Actuellement, ces espaces pourraient se retrouver sur 2502 ha (ou 1858 ha en prenant en compte l'utilisation du sol agricole).

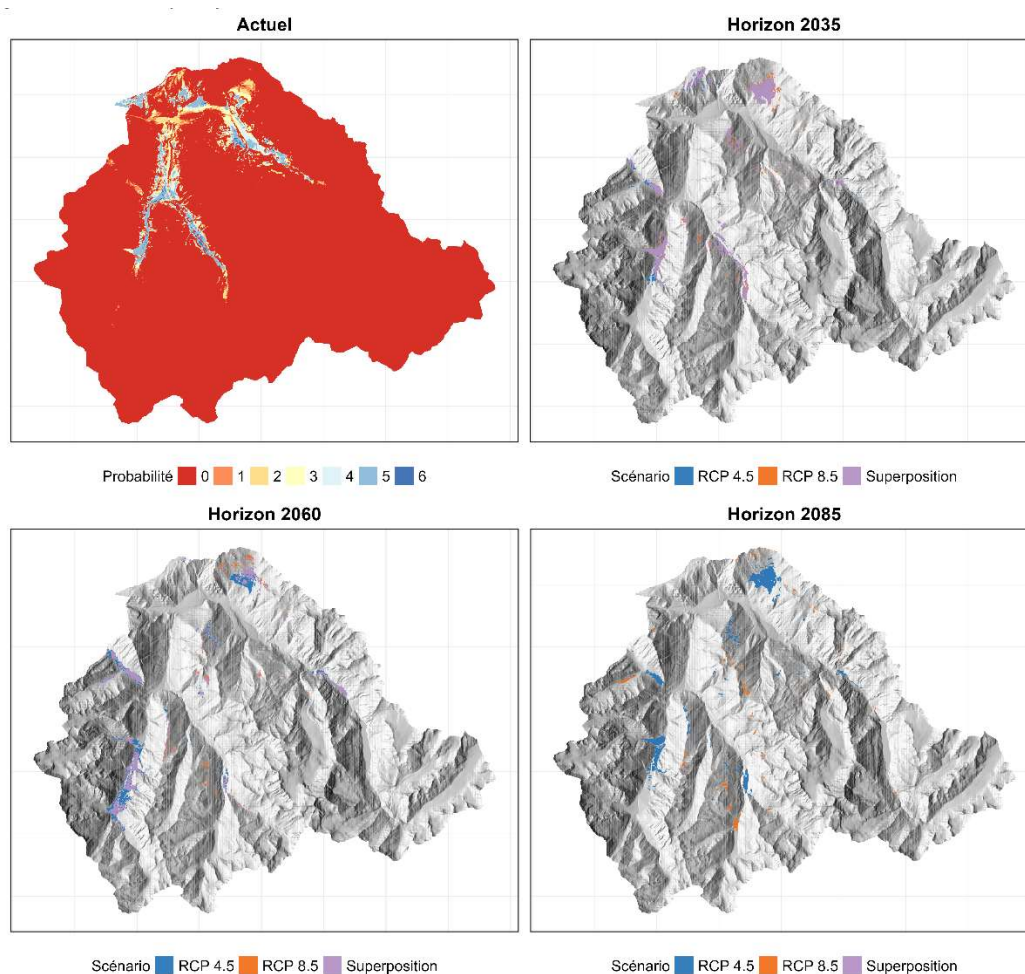


Figure 21: Distribution des conditions potentielles des prairies permanentes en Entremont. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence des prairies permanentes sur le territoire entremontant, avec des valeurs de 0 à 6 correspondant au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence des prairies permanentes. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables aux prairies permanentes selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP 4.5, en orange pour le scénario RCP 8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables aux prairies permanentes sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

L'évolution de la répartition des conditions climatiques favorables marque à nouveau une augmentation altitudinale des conditions propices aux prairies permanentes. Ceci se marque par le fait que des régions de plus haute altitude, comme le haut des vallées, acquièrent les conditions préférentielles des prairies permanentes. Ce cas est particulièrement visible autour de 2060, quand les conditions favorables aux prairies permanentes atteignent les régions de La Fouly, Champex-Lac, Verbier et Bourg-Saint-Pierre. Pour les prairies permanentes, les différents scénarii climatiques ont une importance non négligeable, provoquant d'importantes différences. Dans le scénario RCP 4.5, certaines prairies, notamment la région de Saleinaz, Champex, Verbier et Bourg-Saint-Pierre, seront toujours intéressantes climatiquement. Il est cependant intéressant de noter que ces régions rejoignent les conditions topo-climatiques favorables pour le blé sous le scénario RCP 8.5. Cependant, en cas de scénario RCP 8.5, seules des régions de plus haute altitude proposeront des conditions climatiques favorables, les régions plus basses auront certainement des conditions trop

chaudes ou trop sèches pour continuer à être exploitées de cette manière, à moins de mesures d'adaptation comme l'irrigation.

La distribution des conditions préférentielles des prairies permanentes en Gruyère (fig. 22) suit la même tendance qu'en Entremont, soit dans la partie plane du Plateau (dans les alentours de Bulle) et dans la vallée d'Intyamont ainsi que dans le val de Charmey et à Jaun, ce qui équivaut aux parties les plus planes tant sur le Plateau que dans les vallées préalpines. Ces espaces représentent 14 867 ha dans la région (ou 11 750 contraints par l'utilisation du sol).

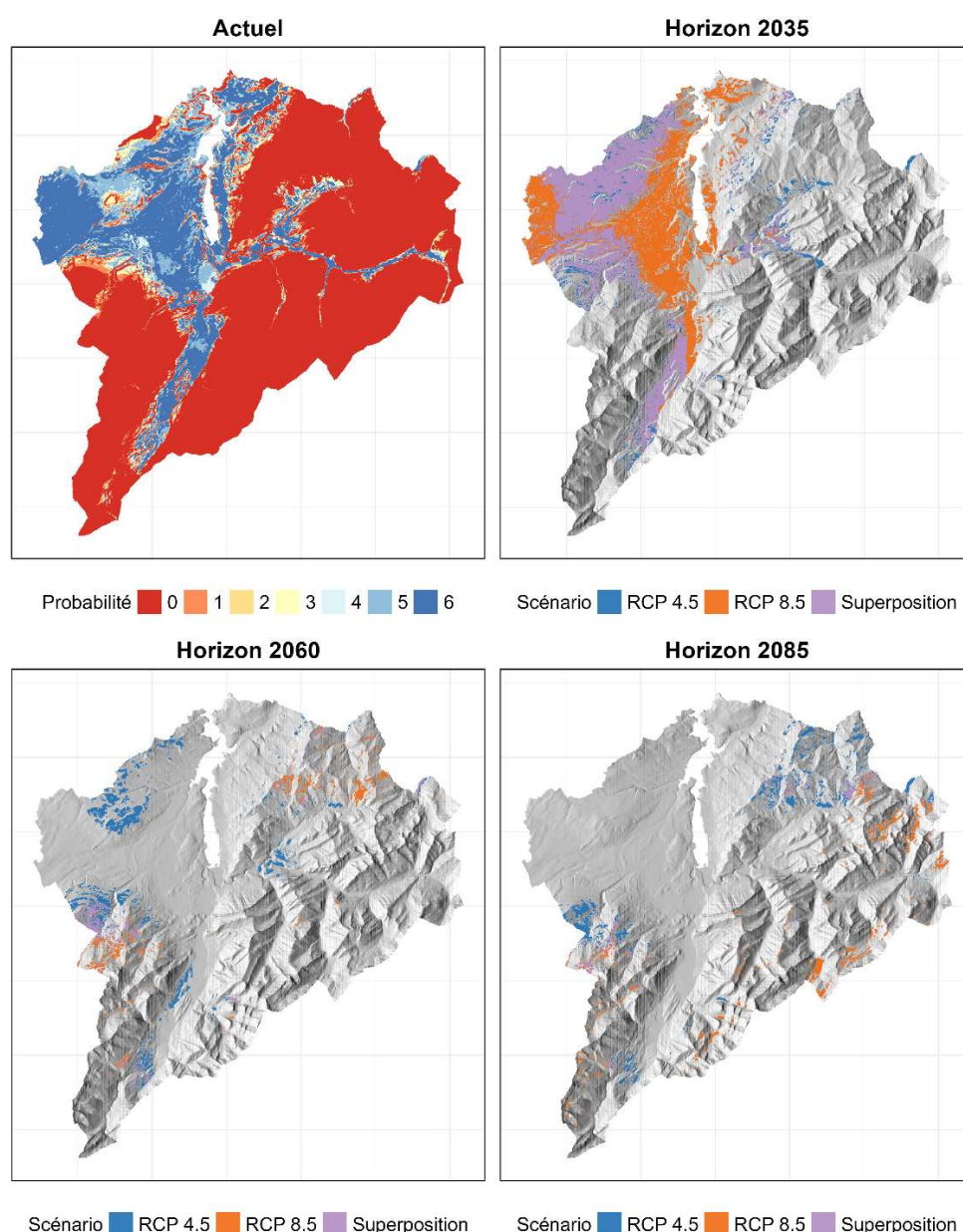


Figure 22 : Distribution des conditions potentielles des prairies permanentes en Gruyère. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence des prairies permanentes sur le territoire gruérien, avec des valeurs de 0 à 6 correspondant au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence des prairies permanentes. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables aux prairies permanentes selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP4.5, en orange pour le scénario RCP8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables aux prairies permanentes sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

De la même manière, les conditions favorables pour les prairies permanentes diminuent et se déplacent dans des régions plus en altitude. La surface favorable aux prairies permanentes recule nettement dès les horizons 2060, mais reste relativement prépondérante jusqu'en 2035. Certaines régions, comme le haut de la vallée de l'Intyamon, plus haute en altitude, semblent cependant maintenir de conditions plus favorables, y compris pour les horizons les plus lointains.

De plus, comme en Entremont, les différents scénarii climatiques influencent différemment les projections pour les prairies permanentes. Sous le scénario RCP 4.5, certaines zones, telles que le fond de l'Intaymon, le Gibloux, Charmey et une partie sous le Moléson, semblent maintenir des conditions favorables pour ce *code culture*. En revanche, dans un contexte de réchauffement climatique plus intense, l'étendue des surfaces favorables dans ces régions devrait fortement diminuer, réduisant ainsi considérablement les zones propices à la conservation des prairies permanentes sur le territoire.

Ainsi, l'évolution des conditions climatiques favorables aux prairies permanentes s'inscrit dans une dynamique générale de recul des surfaces propices, observable tant en Entremont qu'en Gruyère (tab. 13).

Tableau 13 : Évolution des conditions favorables pour les prairies permanentes en pourcentage par rapport à la situation actuelle

<i>Prairies permanentes</i>								
Entremont					Gruyère			
RCP4.5		RCP8.5		RCP4.5		RCP8.5		
<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	
2035	-37 %	-53 %	-33 %	-49 %	-17 %	-19 %	-10 %	-13 %
2060	-36 %	-59 %	-40 %	-57 %	-30 %	-34 %	-25 %	-30 %
2085	-53 %	-68 %	-70 %	-75 %	-24 %	-29 %	-25 %	-28 %

Dès 2035, les premières diminutions sont notables : en Entremont, les surfaces favorables chutent de 37% à 53% selon le scénario, et cette tendance s'intensifie à mesure que l'on progresse dans le temps. À l'horizon 2085, les pertes atteignent jusqu'à 70% (non contraint) et 75% (contraint) sous le scénario RCP 8.5, traduisant une forte vulnérabilité de ces milieux non seulement au réchauffement des températures mais aussi à un stress hydrique plus important. La Gruyère suit une trajectoire similaire à celle de l'Entremont, bien que les baisses soient légèrement plus modérées. Dès 2035, les pertes oscillent entre 10% et 19%, et atteignent jusqu'à 28% en 2085, témoignant d'une meilleure stabilité des surfaces favorables en Gruyère comparativement à l'Entremont.

Ces résultats illustrent clairement la sensibilité des prairies permanentes aux changements climatiques, avec des différences marquées selon les scénarii. Le scénario RCP 4.5 permettrait

de conserver une proportion plus importante de surfaces favorables, notamment dans certaines régions comme les fonds de vallées de l'Intyamon ou les contreforts du Gibloux. En revanche, sous le scénario RCP 8.5, seules des zones très restreintes en altitude ou protégées par les reliefs pourraient encore offrir des conditions adéquates, que ce soit à Champex, au pied du Moléson ou au fond du Val de Charmey. Cette contraction des conditions favorables, combinée à une montée en altitude, implique un recul net des prairies permanentes vers des zones plus enclavées, réduisant potentiellement leur accessibilité et leur utilisation agricole.

4.2.3 Les pâtures extensifs

Comme une transition entre les régions planes et les régions plus pentues, l'utilisation actuelle des pâtures extensifs en Entremont (fig. 23) se situe principalement dans les régions avec une topographie plus marquée. La grosse différence entre la surface potentielle favorable aux pâtures extensifs en Entremont (15 905 ha) et la surface contrainte effectivement agricole (4 079 ha) s'explique principalement par la place prépondérante occupée par la forêt dans cette région, notamment la forêt de protection. En effet, les pâtures extensifs se situent souvent dans des zones à topographie marquée, comme les versants des vallées, où la forêt est largement présente. Cette couverture forestière limite fortement la surface disponible pour le pâturage agricole, réduisant la surface contrainte.

Ainsi, les régions qui n'étaient favorables ni pour les cultures ni pour les prairies le sont désormais pour les pâtures extensifs. Les conditions peuvent alors être plus pentues, plus fraîches et se retrouver dans des régions périphériques par rapport aux villages.

Les projections issues des différents scénarii climatiques révèlent des tendances similaires quelles que soient l'échéance ou le scénario considéré. En particulier, les extrêmes altitudinaux des zones favorables aux pâtures extensifs restent quasiment inchangés. En revanche, les surfaces favorables situées au fond des vallées diminuent progressivement selon les horizons temporels et avec l'intensification du changement climatique. Cela souligne que les conditions favorables à ce type d'exploitation sont étroitement liées à l'altitude : les régions de basse altitude devenant trop chaudes et sèches pour maintenir les pratiques actuelles en cas de réchauffement marqué.

Ceci se reflète également par le fait qu'à l'horizon 2035, toute la partie supérieure du territoire n'aurait des conditions climatiques potentielles pour les pâtures extensifs que par le scénario RCP 8.5. Ainsi des territoires en plus haute altitudes pourraient désormais avoir des conditions favorables pour ce *code culture* lors du scénario climatique extrême (RCP 8.5), ce qui n'est pas le cas du scénario modéré (RCP 4.5). En suivant cette même tendance, aux horizons 2060 et 2085, les zones correspondantes aux altitudes les plus basses ne conserveraient des conditions favorables qu'avec le scénario RCP 4.5, les autres devenant trop chaudes et sèches pour que ce *code culture* retrouve des conditions favorables.

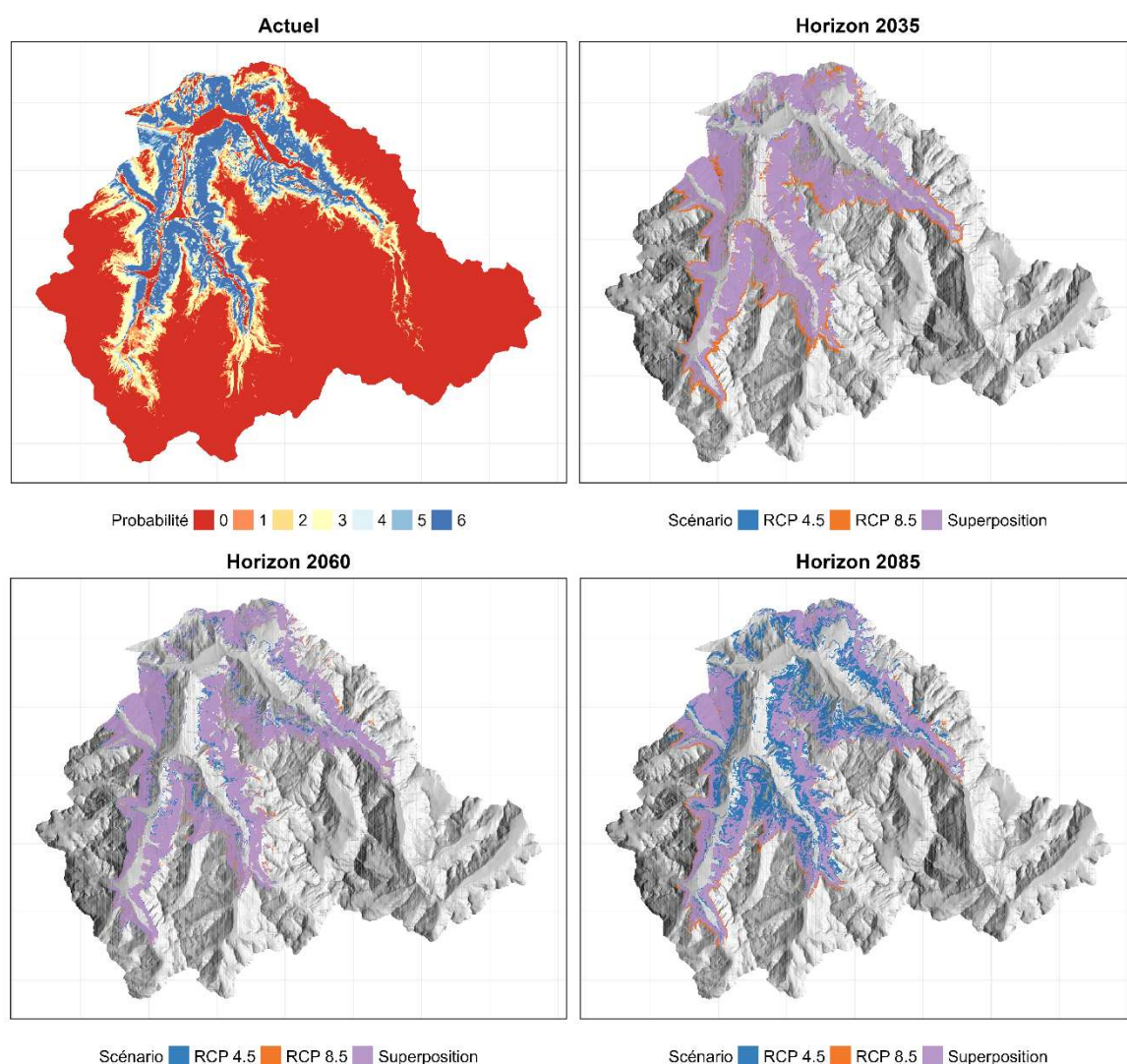


Figure 23 : Distribution des conditions potentielles des pâturages extensifs en Entremont. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence des pâturages extensifs sur le territoire entremontant, avec des valeurs de 0 à 6 correspondant au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence des pâturages extensifs. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables aux pâturages extensifs selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP 4.5, en orange pour le scénario RCP 8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables aux pâturages extensifs sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

En Gruyère, la répartition des pâturages extensifs suit la même tendance qu'en Entremont, avec les versants des montagnes et collines comme étant convenables pour de telles utilisations (fig. 24). Ainsi, les pâturages extensifs peuvent principalement être trouvés dans les sillons du Plateau ainsi que dans toute la région du Gibloux, la rive droite du lac de la Gruyère ainsi que dans les vallées des Préalpes. Ces régions représentent ainsi 12 864 ha (8 720 contraintes). La différence au niveau de l'utilisation du sol est moins importante, notamment parce qu'il y a beaucoup moins de forêt de protection qu'en Entremont. À nouveau, la gradation entre les prairies et les pâturages est plus nette : là où les prairies permanentes s'arrêtent, commencent celles des pâturages extensifs.

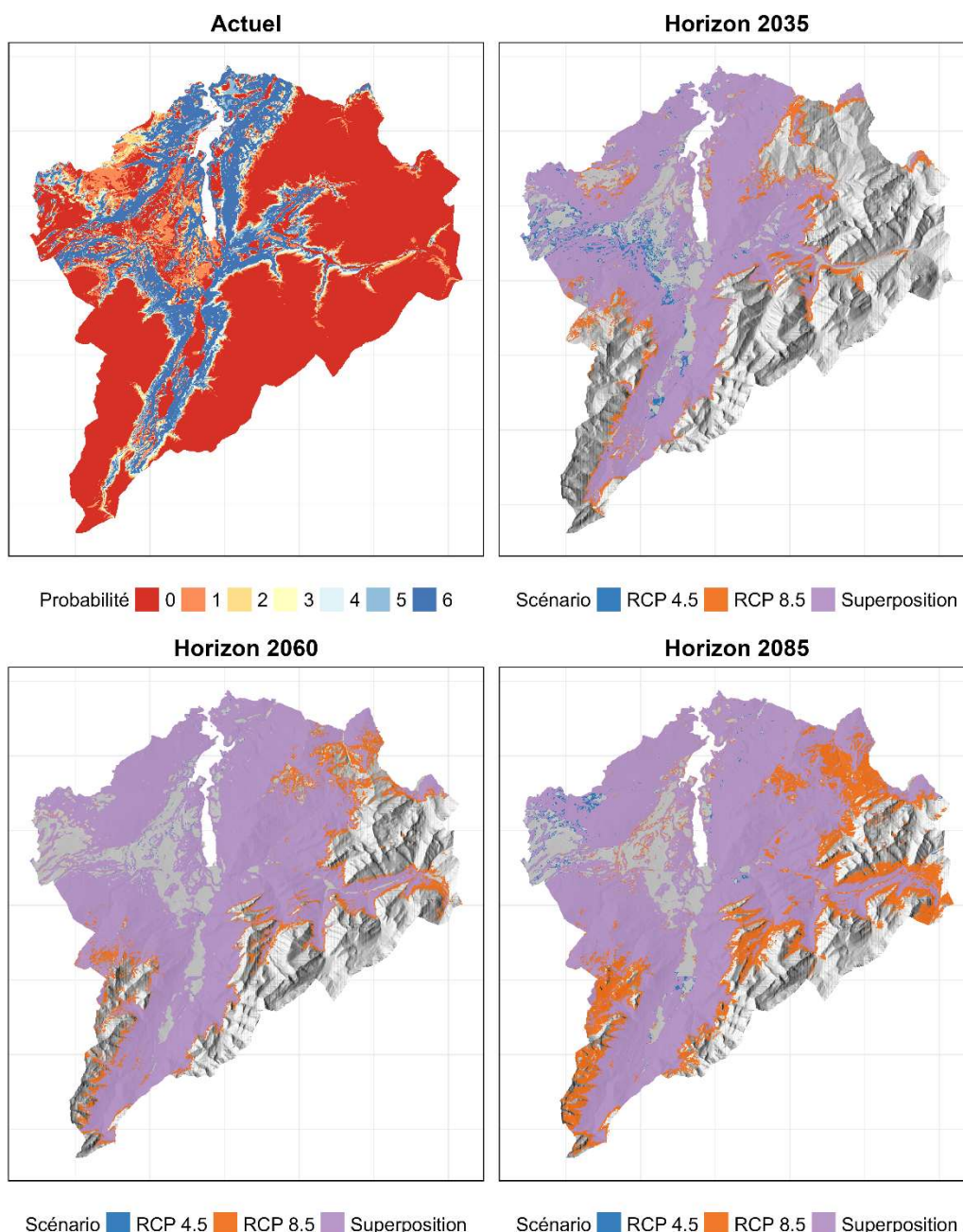


Figure 24 : Distribution des conditions potentielles des pâturages extensifs en Gruyère. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence des pâturages extensifs sur le territoire gruérien, avec des valeurs de 0 à 6 correspondant au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence des pâturages extensifs. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables aux pâturages extensifs selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP 4.5, en orange pour le scénario RCP 8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables aux pâturages extensifs sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

Les scénarii climatiques révèlent des évolutions notables dans la répartition des surfaces favorables aux pâturages extensifs. Plus on avance dans le siècle, plus ces surfaces s'étendent, notamment sous le scénario RCP 8.5, où l'augmentation est particulièrement marquée. Contrairement à une simple gradation, il n'y a pas de réduction des zones favorables en basse altitude. Au contraire, la catégorie « pâturages extensifs » apparaît géographiquement plus diffuse et moins spécifique, étant présente sur l'ensemble du territoire, y compris dans des

secteurs de Bulle ou du Plateau. Cette diffusion partielle explique que les conditions considérées comme favorables s'étalent à des altitudes plus basses, ce qui reflète davantage des modalités actuelles d'utilisation agricole que des contraintes topo-climatiques strictes.

L'analyse chiffrée des résultats des projections confirme la tendance observée sur les cartes : les pâturages extensifs bénéficient, dans les deux régions, de conditions climatiques de plus en plus favorables au fil du temps, notamment en contexte de réchauffement prononcé (tab. 14).

Tableau 14 : Évolution des conditions favorables pour les pâturages extensifs en pourcentage par rapport à la situation actuelle

<i>Pâturages extensifs</i>								
Entremont					Gruyère			
RCP4.5		RCP8.5		RCP4.5		RCP8.5		
Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	
2035	33 %	56 %	35 %	63 %	107 %	102 %	110 %	101 %
2060	39 %	64 %	51 %	80 %	168 %	154 %	193 %	175 %
2085	50 %	82 %	61 %	79 %	166 %	150 %	236 %	212 %

En Entremont, les surfaces favorables augmentent nettement entre 2035 et 2085, passant de +33% à +82% en situation non contrainte selon le scénario RCP 4.5, et jusqu'à +64% à +82% sous le scénario RCP 8.5. Cette hausse est encore plus marquée en Gruyère, où l'on observe une progression fulgurante, avec +107% dès 2035 (non contraint, RCP4.5) et jusqu'à +236% à l'horizon 2085 sous le scénario RCP 8.5. Même les surfaces contraintes par l'usage agricole suivent cette dynamique, avec une progression dépassant les +200% pour le scénario le plus pessimiste.

Cependant, il convient de noter que l'usage réel du sol et les pratiques agricoles influencent également ces chiffres. En effet, les agriculteurs de Gruyère déclarent volontairement des surfaces en pâturages extensifs, même lorsque les conditions topo-climatiques ne sont pas pleinement optimales, notamment pour respecter les exigences relatives aux réseaux écologiques et aux normes environnementales. Ce contexte ajoute une dimension réglementaire et socio-économique à l'interprétation des surfaces favorables, contribuant à une certaine dilution de la répartition précise des conditions favorables strictement climatiques, expliquant en partie l'élargissement important de ces surfaces.

On observe une dynamique progressive de déplacement des conditions optimales vers des zones situées à plus haute altitude, au détriment des secteurs de basse altitude qui deviennent progressivement trop chauds pour cette utilisation des sols, comme c'est également le cas en Entremont. Le contraste entre les deux scénarii est par ailleurs frappant : sous le scénario RCP 8.5, les pâturages extensifs pourraient s'étendre bien au-delà des limites

actuelles, couvrant presque entièrement les surfaces favorables selon le scénario RCP 4.5, ce qui souligne leur plasticité dans des contextes climatiques plus extrêmes.

4.2.4 Les pâturages d'estivage

L'utilisation actuelle des pâturages d'estivage dans l'Entremont (fig. 25) se concentre principalement dans les zones d'altitude, situées dans les parties supérieures de la zone d'étude. Cela implique que l'ensemble du district pourrait, en théorie, présenter des conditions favorables à ce type d'usage. Les pâturages d'estivage occupent ainsi les hauteurs, en cohérence avec les conditions climatiques actuellement optimales pour leur maintien. Cette surface représente au total 51 478 ha, dont seulement 12 246 ha sont contraints à la surface agricole utile (SAU). Cette importante différence s'explique principalement par le fait qu'une grande partie des surfaces climatiquement favorables correspond à des zones non agricoles, comme les rochers, les marges proglaciaires ou les glaciers.

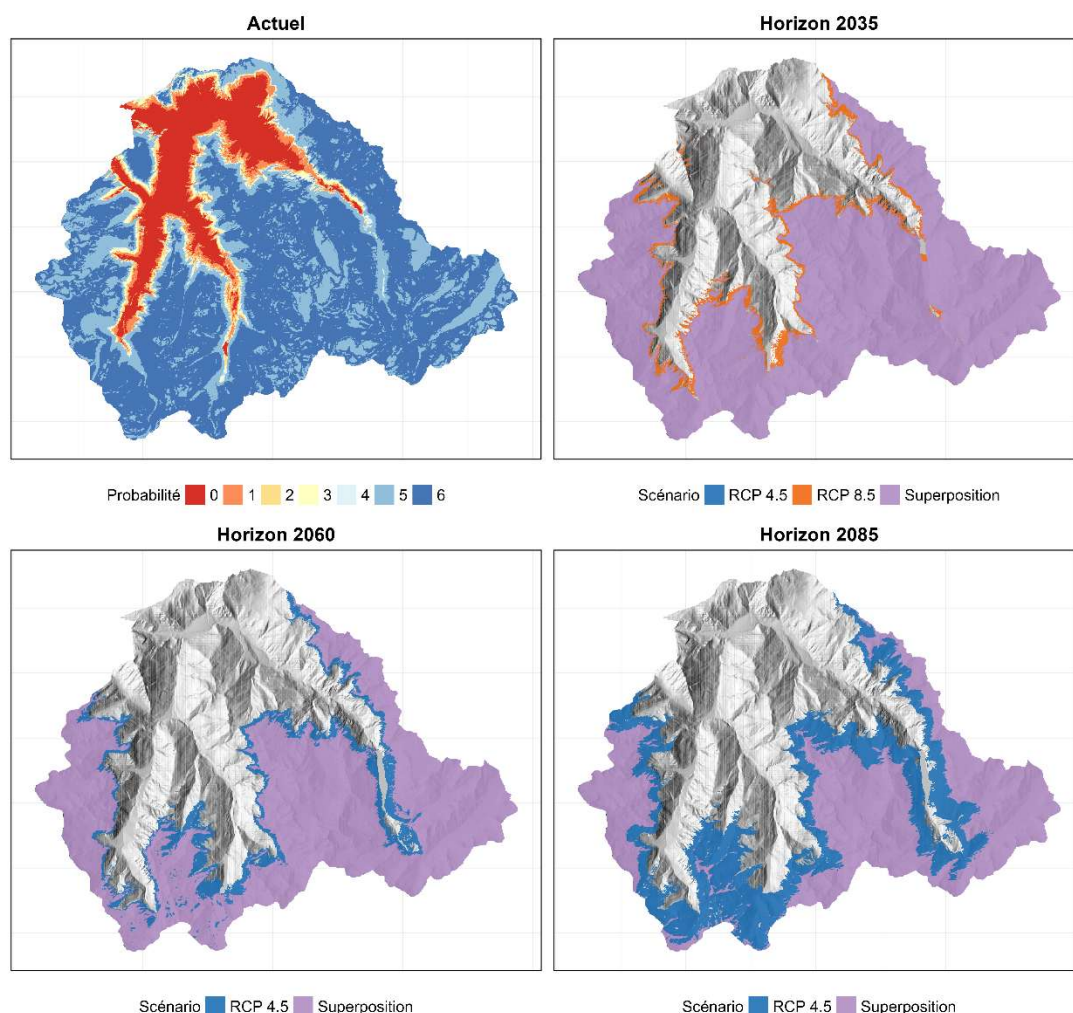


Figure 25 : Distribution des conditions potentielles des pâturages d'estivage en Entremont. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence des pâturages d'estivage sur le territoire entremontant, avec des valeurs de 0 à 6 correspondant au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence des pâturages d'estivage. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables aux pâturages d'estivage selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP 4.5, en orange pour le scénario RCP 8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables aux pâturages d'estivage sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

L'évolution des régions bénéficiant de conditions climatiques favorables aux pâturages d'estivage révèle une progression nette vers des altitudes plus élevées au fil des différentes périodes étudiées. Les zones de basse altitude deviennent quant à elles moins adaptées à cet usage, car les conditions qui y prévalent ne correspondent plus aux exigences spécifiques de ce *code culture*.

La limite basse des pâturages d'estivage ne cesse de s'élever, réduisant l'espace exploitable aux secteurs de très haute altitude, actuellement occupés principalement par des glaciers et des formations rocheuses. Cette stratification altitudinale est fortement influencée par les scénarii climatiques : de manière générale, le scénario RCP 4.5 permet de préserver une plus grande étendue de surfaces favorables, avec des zones potentielles de pâturages pouvant s'étendre plus en profondeur dans les vallées par rapport au scénario RCP 8.5. Cette différence devient particulièrement nette à l'horizon 2085, où les conditions favorables sous le scénario RCP 8.5 se confindraient essentiellement aux plus hautes altitudes.

De manière similaire, les conditions favorables aux pâturages d'estive se répartissent majoritairement sur les hautes altitudes du district de la Gruyère, représentant 29 092 ha en surface potentielle, dont 16 417 ha contraints à la surface agricole utile (fig. 26). Il est intéressant de noter que l'écart entre surfaces potentielles et contraintes est ici moins important qu'en Entremont, ce qui confirme que les pâturages d'estive occupent une large part du territoire gruérien, avec une proportion plus faible de zones improductives (marges proglaciaire, glacier, rochers etc.).

Ainsi, les hauts du Gibloux, les parties supérieures de l'Intyamon, la région de Charmey et de Jaun en font partie. Il est intéressant de souligner que la limite supérieure des pâturages extensifs coïncide souvent avec la limite inférieure des pâturages d'estivage. Cette stratification ne reflète pas tant une différence dans les conditions climatiques ou les pratiques de pâturage, qui sont similaires, impliquant la mise au pâturage d'animaux, mais résulte principalement d'une distinction administrative. En effet, ce qui différencie avant tout ces deux catégories, c'est la saisonnalité d'exploitation, les enjeux économiques associés ainsi que le cadre réglementaire spécifique à chacune.

La surface favorable aux pâturages d'estive diminue progressivement, surtout dans les secteurs les plus bas, notamment autour de la Berra, de Charmey et dans les parties basses de l'Intyamon, ce qui concerne une grande partie des montagnes gruériennes. Ces zones, situées à plus basse altitude voient ainsi leurs conditions favorables se modifier. En revanche, les zones les plus élevées, donc plus fraîches, semblent relativement moins touchées par cette évolution.

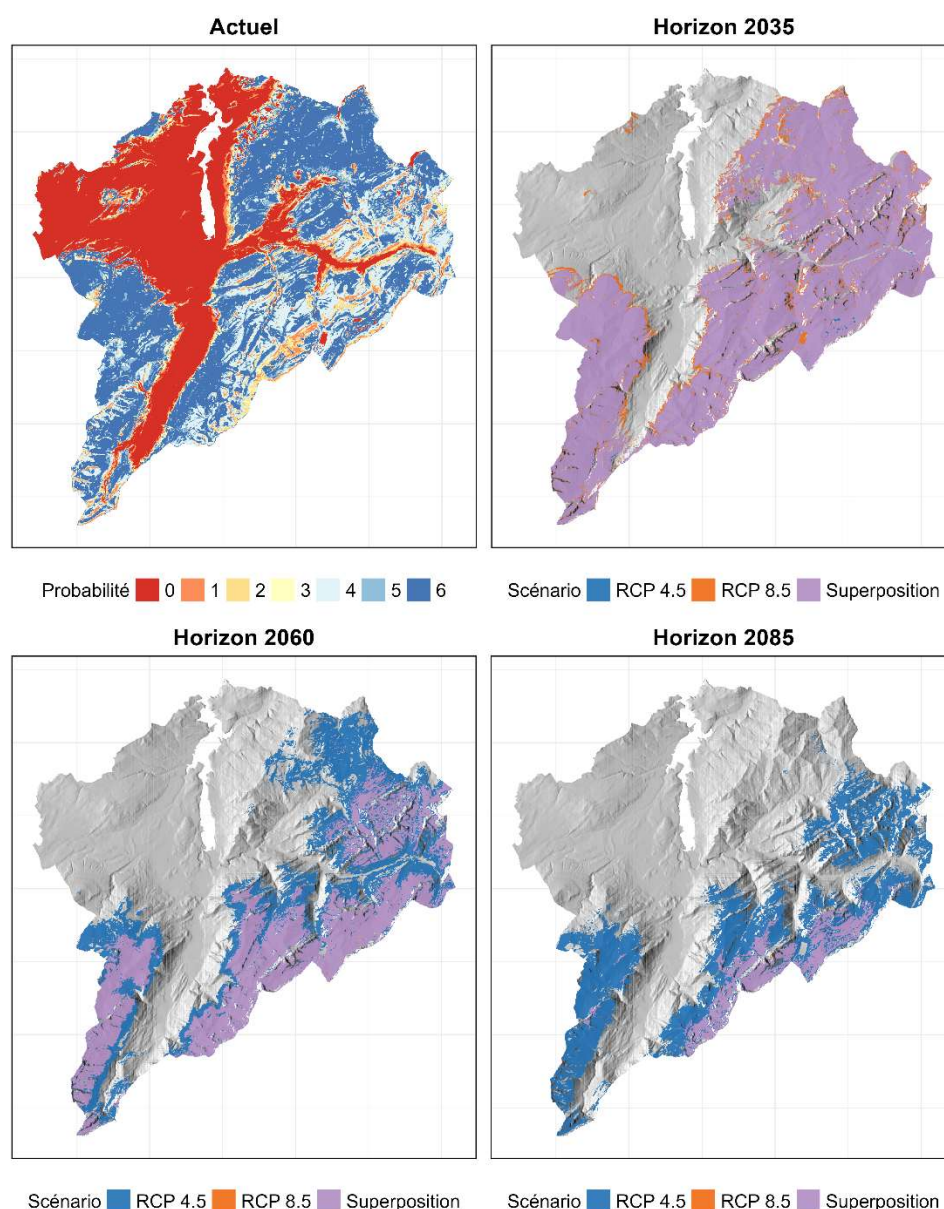


Figure 26 : Distribution des conditions potentielles des pâturages d'estivage en Gruyère. La carte « actuelle » présente la probabilité d'occurrence des pâturages d'estivage sur le territoire gruérien, avec des valeurs de 0 à 6 correspondant au nombre de techniques de modélisation prévoyant la présence des pâturages d'estivage. Les cartes des horizons futurs (2035, 2060 et 2085) illustrent la répartition potentielle des conditions favorables aux pâturages d'estivage selon les différents scénarii climatiques : en bleu pour le scénario RCP 4.5, en orange pour le scénario RCP 8.5. Les zones en violet correspondent à des régions « résilientes », où les conditions favorables aux pâturages d'estivage sont stables pour un même horizon malgré le changement de scénarii climatique.

Les écarts entre scénarii climatiques sont également notables, en particulier pour les horizons temporels les plus lointains. À ces échéances, les conditions favorables dans les zones de basse altitude ne subsisteraient que sous le scénario RCP 4.5. Par ailleurs, les conditions projetées pour 2060 sous le scénario RCP 8.5 correspondent à celles attendues sous le scénario RCP 4.5 en 2085, soulignant ainsi l'impact significatif du scénario sur l'évolution des conditions agro-climatiques.

L'analyse quantitative des projections confirme que les pâturages d'alpage, actuellement cantonnés aux altitudes les plus élevées de l'Entremont (soit potentiellement 51 478 ha, mais

12 246 ha en tenant compte des contraintes administratives), voient leur surface potentielle diminuer de manière significative au fil des horizons temporels (tab. 15).

Tableau 15 : Évolution des conditions favorables pour les pâturages d'estivage en pourcentage par rapport à la situation actuelle

<i>Pâturages d'estivage</i>								
Entremont					Gruyère			
RCP4.5		RCP8.5		RCP4.5		RCP8.5		
<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	<i>Non contraint</i>	<i>Contraint</i>	
2035	– 25 %	–44 %	–21 %	–35 %	–12 %	–10 %	–4%	–4%
2060	–32 %	–56 %	–40 %	– 74 %	–26 %	–22 %	–57 %	–51 %
2085	–33 %	–61 %	–59 %	–98%	–53 %	–47 %	–90 %	–89 %

À l'horizon 2035, les surfaces favorables diminueraient déjà de 25% (en situation non contrainte sous le scénario RCP 4.5) à 44% (en situation contrainte sous le scénario RCP 8.5). Cette tendance s'intensifie nettement en 2060 et 2085, avec des baisses pouvant atteindre jusqu'à 61% en surface non contrainte sous le scénario RCP 8.5, et jusqu'à 98% en situation contrainte. Cela signifie que seule une fraction très réduite du territoire, correspondant aux altitudes les plus extrêmes (aujourd'hui souvent recouvertes par des glaciers ou des zones rocheuses), conserverait encore les conditions topo-climatiques adéquates pour l'estivage tel qu'il est fait actuellement. Sous le scénario RCP 4.5, la baisse est également présente, mais moins brutale, illustrant un recul altitudinal plus progressif. Ainsi, même si la limite inférieure des alpages semble remonter, excluant certaines zones basses actuellement exploitées, cela ne remet pas en cause la pratique pastorale dans ces secteurs.

En Gruyère, cette tendance est également observable, bien que légèrement plus atténuée. Les surfaces favorables aux pâturages d'estive représentent aujourd'hui 29 092 ha (dont 16 417 ha contraints), mais ces chiffres baissent fortement au fil des horizons temporels. Sous le scénario RCP 8.5, la réduction atteint –89% en 2085 pour les surfaces contraintes, contre – 47% sous le scénario RCP 4.5. Dès 2060, la baisse est marquée avec –57% (non contraint) sous le scénario RCP 8.5. Cette dynamique reflète une perte massive des conditions propices dans la région de La Berra, Charmey et du bas-Intyamon, alors que les zones les plus élevées semblent mieux résister. Ces résultats confirment un déplacement vers le haut des gradients altitudinaux des conditions optimales pour les pâturages d'estivage. Dans un contexte de réchauffement accru, ces zones risquent de devenir de plus en plus restreintes.

De plus, cette analyse met en lumière des régions où les conditions climatiques restent stables entre les différents scénarii, faisant de ces zones des clefs pour l'adaptation. Toutefois, une nette diminution de ces surfaces est observée lorsqu'on passe d'une gestion non contrainte à une gestion contrainte. Les surfaces de ces régions stables sont présentées au tableau 16, tandis que les données relatives aux autres types de gestion du sol se trouvent à l'annexe 9.

Tableau 16: Surfaces stables entre les différents scénarii climatiques selon le type de gestion. Les valeurs présentées correspondent à un territoire non contraint par les législations et usages du sol, ainsi qu'à un territoire soumis à ces contraintes. Les surfaces sont exprimées en hectares.

		Entremont		Gruyère	
		Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
Blé	2035	93,1	34,5	9932,4	6824,6
	2060	322,4	152,4	10 462,8	7093,6
	2085	190,6	79,7	9929,0	6722,1
Prairies permanentes	2035	1 027,6	384,8	5195,6	3692,9
	2060	752,1	295,1	456,7	174,8
	2085	3,4	2,7	268,6	124,3
Pâturages extensifs	2035	12 812,6	2566,1	20 544,7	11 581,7
	2060	11 250,4	2437,9	27 642,5	14 789,6
	2085	8178,8	1852,4	28 437,6	15 065,2
Pâturages d'estivage	2035	36942,1	5743,7	24 016,8	11 808,8
	2060	29 079,5	2 292,9	10 220,4	5725,8
	2085	18 565,4	80,2	2243,1	1189,1

4.3 PERCEPTION DES AGRICULTEURS

Cette partie repose sur des entretiens semi-directifs conduits auprès d'agriculteurs afin de comprendre leur perception des effets actuels et potentiels futurs du changement climatique sur leurs exploitations. Ces entretiens visent à recueillir des points de vue qualitatifs sur les impacts perçus, les difficultés rencontrées, ainsi que les stratégies d'adaptation mises en place ou envisagées par les agriculteurs face aux évolutions climatiques

4.3.1 Impact du changement climatique

Compte tenu de la diversité des profils d'exploitation, les effets perçus du changement climatique varient sensiblement d'une région à l'autre et d'un exploitant à l'autre. Toutefois, les agriculteurs déjà fortement touchés par ces évolutions se disent généralement plus préoccupés par cette question. Pour certains, l'agriculture a toujours su s'adapter aux aléas climatiques et les événements récents ne constituent pas une source majeure d'inquiétude ; pour d'autres, en revanche, la nécessité d'adaptation apparaît comme pressante. Tous ceux interrogés font néanmoins état de changements notables, même si leur intensité est ressentie de manière inégale.

La sécheresse et la diminution des réserves en eau sont des préoccupations partagées par l'ensemble des exploitants. Parmi les facteurs climatiques jugés les plus préoccupants, la sécheresse arrive en tête (5 personnes sur 10), suivie des phénomènes extrêmes (3 personnes

sur 10), en particulier les alternances brutales entre longues périodes sèches et pluies intenses, et du manque d'eau (2 personnes sur 10).

Les principaux éléments climatiques évoqués lors des entretiens sont regroupés dans le tableau 17 :

Tableau 17 : Synthèse des principaux processus naturels et impacts du changement climatique pour les pratiques agricoles évoqués par les agriculteurs.

Facteurs physiques du changement climatique et impacts sur les processus naturels		
<i>Sécheresses</i>	<i>Tarissement des sources d'eau</i>	<i>Perturbations géomorphologiques</i>
<i>Températures</i>	<i>Diminution de la neige</i>	
<i>Extrêmes climatiques</i>	<i>Inondations</i>	

Impacts sur les pratiques agricoles		
<i>Impacts sur les animaux</i>	<i>Impacts sur la végétation</i>	<i>Impacts géomorphologiques</i>
<i>Pénuries d'eau</i>	<i>Stress hydrique</i>	<i>Le sol n'absorbe pas correctement</i>
<i>Baisse de production laitière</i>	<i>Moins de qualité</i>	<i>Glissements de terrain</i>
<i>Stress chez l'animal</i>	<i>Moins de quantité</i>	<i>Laves torrentielles</i>
	<i>Avancement de la phénologie</i>	<i>Chutes de pierres</i>
	<i>Baisse de production estivale</i>	
	<i>Remontée de la limite de la forêt</i>	

4.3.1.1 Les températures

D'après les différents entretiens, la température exerce de multiples influences, à la fois sur la végétation et sur les animaux. Pour les plantes, les fortes chaleurs peuvent provoquer un dessèchement, voire un "grillage" des espèces végétales, un phénomène particulièrement marqué en altitude. Les végétaux se flétrissent, se recroquevillent, et la qualité comme la quantité du fourrage s'en trouvent diminuées. Cet impact est d'autant plus prononcé dans les zones à sols peu profonds et secs, comme les alpages de l'Intyamon ou de l'Entremont, tandis qu'il est atténué dans les régions à sols profonds et humides, notamment à la base des Préalpes, autour de Bulle.

La température affecte également le bien-être animal. Les épisodes de canicule génèrent un stress thermique chez les animaux, réduisant leur rendement. La production laitière des vaches diminue lors des fortes chaleurs, tandis que celle des chèvres est davantage impactée par les pluies intenses. Pour améliorer leur confort, plusieurs agriculteurs soulignent l'importance de fournir des zones d'ombre (haies, arbres ou abris) dans les pâturages.

La hausse des températures influe aussi sur la phénologie des végétaux : tous les agriculteurs interrogés s'accordent à dire que la saison de croissance commence plus tôt et se termine plus tard. En Gruyère, certains exploitants indiquent pouvoir sortir leurs troupeaux dès mars-avril et jusqu'à novembre-décembre. En Entremont, cette extension de la saison de croissance est également observée, mais dans une moindre mesure, car la neige semble y persister plus longtemps et retarde le démarrage de la croissance herbagère. Par ailleurs, les deux

exploitants d'alpages rencontrés signalent une nette progression des arbres en altitude, en particulier des espèces de la lande comme les épineux, les genévriers ou encore les rhododendrons. En Valais, certains observent même une remontée de la végétation herbacée dans des zones anciennement improductives.

Les températures estivales élevées affectent également la dynamique de pousse de l'herbe. Tous les agriculteurs notent un creux marqué de la croissance en été, notamment en juillet et août. Bien que la production totale d'herbe sur l'année puisse rester stable, elle se répartit désormais de manière inégale, avec une véritable "période creuse" en plein été, comme indiqué par l'un des agriculteurs gruérien :

C'est un peu plus dur à gérer. Parce qu'avant on montait plus tard sur l'alpage, l'herbe elle grandissait, ça suivait. Et puis on pouvait manger au fur et à mesure. Tandis que maintenant l'herbe elle vient plus vite, on doit monter plus vite, mais l'été est plus long. Alors il faut faire gaffe de ne pas monter trop tard, pour quand même pouvoir manger un peu, pour qu'il y ait des gros foins plus tard et qu'il y ait quand même une bonne production laitière au départ tout en ayant assez d'herbes jusqu'à la fin, alors ce n'est pas toujours facile à gérer (Un agriculteur gruérien, comm. orale, juin 2025).

Ce phénomène est particulièrement aigu dans les régions d'altitude comme l'Entremont ou sur les versants exposés des Préalpes. Sans stratégie d'adaptation, les pertes de rendement peuvent être importantes. Enfin, il est important de souligner que ces effets thermiques sont intimement liés à la disponibilité en eau et aux précipitations, qui modulent directement la phénologie et la productivité des surfaces herbagères.

4.3.1.2 Les précipitations et les ressources en eau

Un autre changement climatique important soulevé par les exploitants est la modification du régime des précipitations. Pour commencer, tous mettent en avant que les pluies arrivent plus souvent de manière diluvienne. Ceci a des impacts sur la végétation qui est ou trop sèche ou inondée ; la pousse s'en retrouve amoindrie. De plus, les stocks naturels d'eau à disposition, tels que la neige ou les lacs, est aussi impactée : les agriculteurs gruériens mettent en avant la diminution des stocks d'eau sous forme de neige et ainsi un départ plus rapide de la végétation au printemps. Avec la baisse des volumes neigeux et les saisons de végétation plus longues, certaines régions de hautes montagnes voient leur végétation changer. Ils mettent aussi en avant le fait que les sources d'eau se tarissent durant l'été alors qu'il y a quelques années ce n'était pas encore le cas, accentuant la nécessité de gestion de l'eau.

Les agriculteurs entremontants mentionnent l'importance de la fonte des glaciers en mettant en avant que ce soit dans un premier temps un gain car il y a plus de ressources à disposition mais que cela deviendra un problème et que la mise en place d'infrastructures de stockage est à prévoir, notamment dans les alpages. Pour l'instant, la principale préoccupation en Entremont porte davantage sur l'accès à la ressource en eau, notamment en raison du vieillissement des réseaux d'irrigation existants et des frais qui en découlent :

Alors justement, maintenant on a le circuit d'irrigation qui arrive gentiment bien fatiguer. Et puis c'est un coût qui va s'élever à X millions. Bon, subventionné à 80%. Et puis sur tout circuit d'irrigation, il y a plus de 700 propriétaires terriens et une quarantaine d'exploitation. Alors ça va coûter X millions aux propriétaires. Est-ce qu'ils vont accepter ou pas? Moins sûr... (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

4.3.1.3 Les extrêmes climatiques

La succession de périodes de sécheresse et d'épisodes de pluies intenses constitue une préoccupation majeure pour l'ensemble des agriculteurs interrogés. Toutefois, les sensibilités régionales divergent quant à la nature et à l'impact de ces événements extrêmes.

Si tous reconnaissent l'importance croissante des sécheresses, ce sont surtout les exploitants de l'Entremont qui insistent sur la gravité de cette problématique. La région valaisanne semble en effet davantage exposée aux pénuries d'eau, rendant la question de l'irrigation particulièrement centrale, contrairement à la Gruyère, où cette contrainte est moins marquée. Plusieurs agriculteurs valaisans rapportent une baisse significative de la production lors des années sèches, compromettant parfois l'équilibre fourrager de leur exploitation, comme le relève cet agriculteur entremontant :

Parce que moi je pense que sans l'irrigation, des années sèches comme en 2022, on arriverait à produire 50% du fourrage. Alors voilà ... ça veut dire diminuer le troupeau de moitié mais il y aura de toute façon des années plus généreuses... Après pour une exploitation comme la mienne, je pense que la seule solution pour faire face à ce problème-là, c'est de faire tampon avec les stocks de fourrage (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

Ce constat souligne la vulnérabilité accrue de certains territoires face aux aléas climatiques et la nécessité d'adaptations ciblées selon les contextes locaux.

Le phénomène de sécheresse se révèle moins problématique au pied des Préalpes, où les sols, plus profonds et mieux pourvus en matière organique, offrent une certaine résilience face au déficit hydrique. De plus, ces zones bénéficient généralement de précipitations plus régulières, ce qui atténue les effets des périodes sèches. Néanmoins, les agriculteurs de cette région sont conscients que cette situation pourrait évoluer. Ils identifient déjà des zones plus vulnérables, en particulier les alpages de l'Intyamont, ainsi que les versants exposés au sud ou caractérisés par des sols peu épais. Ces espaces apparaissent comme les premiers touchés par la sécheresse à venir, et pourraient à terme nécessiter des adaptations spécifiques pour maintenir leur productivité, comme le souligne Pascal :

Alors, la sécheresse, on en a eu quelques années. Mais il faut dire, ici, c'est encore plus arrosé. Donc, on n'a jamais eu de problème parce qu'il y a quand même plus d'humidité en Gruyère près des montagnes. Personnellement, j'aime presque mieux les années sèches que les années humides. Mais on a aussi dû, des fois, conjuguer avec le manque de fourrage. Mais en plus, ici, c'est de la terre très profonde qui supporte beaucoup l'humidité. Donc, c'est gorgé d'eau. Donc, même si c'est une année sèche, il n'y a pas trop de problématiques. Puis, les cultures supportent quand même plus le sec. (Pascal, comm. orale, mai 2025).

La question des précipitations intenses a également été soulevée par plusieurs agriculteurs. Si l'impact de ces épisodes a été évoqué en Entremont, notamment à travers les coulées de lave torrentielle comme celles survenues à Lourtier, c'est en Gruyère que les discussions à ce sujet ont été les plus approfondies. Les agriculteurs fribourgeois insistent sur les conséquences parfois dévastatrices des orages violents, des épisodes de grêle ou des pluies intenses. La force de l'eau peut provoquer d'importants dégâts aux cultures et sur les surfaces herbagères : destruction des plantations, baisse de la qualité du fourrage, mais aussi érosion marquée des sols. Ces événements, encore ponctuels, soulèvent des inquiétudes croissantes face à leur fréquence et leur intensité supposées à venir :

Quand il pleut pendant trois quatre jours gentiment, la terre pompe bien. Quand la terre est pleine, comme une éponge, et tout ce qui pleut part au ruisseau. Ça fait de l'érosion, du bordel, parce que ça fait des ruisseaux dans les prés et l'eau part avec la terre. C'est le bordel. J'ai déjà aidé des copains à tout relever des champs : toute la terre était partie sur la route parce qu'ils venaient de semer. Il y a eu des vagues d'eau et un petit peu en pente et des torrents descendaient. Tu as vu le beau village de Blatten ? L'année passée, en bas Billens-Hennens, il y avait des torrents d'eau. (Frédéric, comm. orale, mai 2025).

Les agriculteurs des deux régions reconnaissent clairement les effets du changement climatique sur leurs exploitations. Certains insistent également sur l'importance de la notion de cycle climatique naturel, mais tous s'accordent sur le fait que les impacts actuels du climat sont significatifs et appellent à des ajustements concrets. La question de l'adaptation revient dans l'ensemble des discours, bien qu'elle semble davantage ancrée et considérée comme urgente dans l'Entremont. Dans cette région, les besoins sont perçus comme plus pressants, tandis qu'en Gruyère, les pratiques agricoles restent majoritairement davantage tournées vers la production.

4.3.2 Adaptation des pratiques agricoles

Plusieurs approches d'adaptation ont déjà été envisagées ou mises en œuvre afin de préserver les conditions actuelles ou de s'ajuster aux conditions climatiques.

4.3.2.1 Maintenir les conditions actuelles

La grande majorité des exploitations agricoles anticipent des changements importants de leurs conditions dans le futur. Ce constat s'avère particulièrement marqué pour les prairies permanentes (code 613), qui représentent la principale forme d'exploitation permettant de remplir les granges et d'assurer une certaine autonomie fourragère. Il ressort des entretiens que la priorité pour les agriculteurs est de préserver autant que possible ces parcelles, perçues comme de véritables trésors. Trois grands axes d'adaptation ont été identifiés à ce sujet : la gestion de l'eau et celle des forêts, ainsi que le maintien des alpages. Ce dernier point permet notamment de réduire la pression sur les ressources en foin issues majoritairement des prairies permanentes.

La gestion de l'eau

Dans les discussions, trois types d'eau ont été évoqués : l'eau potable, l'eau domestique et l'eau utilisée pour l'irrigation. Dans le contexte de tarissement des sources et de la fonte des glaciers, la question de la conservation de l'eau est au cœur des enjeux soulevés.

L'approvisionnement en eau potable pour le bétail constitue un enjeu intrinsèque à la gestion hydrique. En Gruyère, cette question est au cœur des préoccupations liées à l'eau. La gestion des stocks est importante, notamment durant l'été et dans les alpages exposés comme en Intyamon, tandis que les alpages situés sur le versant nord semblent nettement moins affectés. Dans les zones les plus sensibles, les agriculteurs mentionnent l'importance d'installer des dispositifs de récupération de l'eau – citernes, récupérateurs d'eau de toiture – ou encore de développer le greffage aux réseaux communaux. Toutefois, ces initiatives se heurtent à des contraintes techniques et financières. La majorité des alpages étant privés dans cette région, les coûts d'une telle infrastructure représentent un frein majeur. Par ailleurs, l'usage multiple de l'eau soulève d'autres interrogations, notamment sur la possibilité pour les régions situées en aval d'accéder également à ces ressources.

En Gruyère, la quasi-totalité des agriculteurs interviewés évoquent le tarissement de leurs sources privées lors d'épisodes caniculaires ainsi que l'importance stratégique de leurs citernes. Certains envisagent d'installer de plus grands réservoirs pour gagner en autonomie et éviter de devoir se raccorder au réseau communal, bien que cette solution reste accessible. En effet, selon Frédéric, le prix du mètre cube d'eau peut atteindre jusqu'à 3 CHF dans certaines régions gruériennes, ayant ainsi de fortes implications sur l'économie des exploitations. La problématique du tarissement des sources est également présente dans le district d'Entremont, en particulier sur la rive droite de la vallée, connue pour son climat plus sec :

C'est que l'eau, elle vient depuis le Torrent de Pont Sec, ben, voilà. Torrent de Pont Sec, il ne s'appelle pas pour rien non plus, Pont Sec, quoi. Il y a de l'eau au printemps, début de l'été, et puis après, il n'y a plus assez, quoi. Donc, côté de la rive droite, là, ça devient problématique (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

La question de l'irrigation est cependant moins présente dans les préoccupations gruériennes, notamment en raison de la profondeur des sols, qui nécessitent moins d'apports hydriques que ceux de la région voisine du Valais. Toutefois, en cas de sécheresses intenses, certaines techniques plus inhabituelles ont été envisagées. Frédéric évoque, par exemple, la possibilité d'irriguer à l'aide de machines à lisier ou de canons, détournés de leur usage habituel :

On a les systèmes pour puriner avec les tuyaux, au lieu de puriner, ben tu mets de l'eau, et puis c'est réglé. C'est pas un coût beaucoup plus cher, mais, alors oui, c'est un coût beaucoup plus cher pour faire la réserve d'eau, mais il devrait, oui, pour faire des réserves d'eau justement, ben pour ça, si d'un coup il viendrait du sec, tout ça (Frédéric, comm. orale, mai 2025).

Le but est ainsi de sauver le maximum de fourrage et de récolte, minimisant les apports extérieurs afin de maintenir une autonomie aussi grande que possible.

En Gruyère, les agriculteurs évoquent également la gestion de l'eau domestique, notamment pour le nettoyage des machines agricoles. Pour cette utilisation, plusieurs soulignent l'intérêt de récupérer l'eau de pluie, jugée particulièrement adaptée car elle ne laisse pas de traces sur les équipements. En période de stress hydrique ou de restrictions, cette ressource peut temporairement être remplacée par des systèmes à air comprimé. Ainsi, au-delà des réserves d'eau de surface, la mise en place de citernes ou d'autres dispositifs de récupération de l'eau pluviale est sérieusement envisagée :

C'est pour ça que les gens, les citadins, forcément, ils négligent aussi ce que l'eau peut apporter. Ils ont des monstres piscines, et tout. Mais comme là, j'ai un voisin, il va creuser une monstre piscine. Il va envoyer 30 000 litres d'eau là-dedans. Puis l'automne, il va la foutre loin, parce qu'elle sera chlorée ; après, c'est foutu. Ça m'énerve, ces piscines. Je sais pas pourquoi ils freinent pas ça aussi. Freiner un peu ces piscines creusées, ces nettoyages de voitures. L'automne et l'été, il fait des monstres sécheresses, tu vois des gens laver leur voiture. Ça, moi, ça me rend franc fou, ça m'énerve. Puis, comme là, l'été, on n'a pas ce manque d'eau, mais... J'essaye de pas trop laver, on ne va pas dire plus laver, parce que je donne un coup de Kärcher tous les mois pour l'hygiène. Sinon, le reste du temps, les machines, c'est plus un coup de soufflette avec l'air comprimé. Faut aussi un peu l'économiser, quoi. (Un agriculteur gruérien, comm. orale, mai 2025).

Dans cette citation, la question de la gestion de l'eau montre aussi sa difficulté, car l'eau est utilisée par de nombreuses personnes avec des mœurs et des buts différents, et la frustration se fait sentir auprès de ceux conscients de la richesse et de l'importance de l'eau. Cette opposition entre des approches utilitaires et plus insouciantes de l'eau est un thème récurrent dans les entretiens menés, en particulier en Gruyère.

La question du partage des ressources en eau est aussi très marquée en Entremont, mais cette fois il s'agit principalement d'eau pour l'irrigation. Cette région, bien plus sèche que la Gruyère, se trouve confrontée à des interrogations récurrentes sur la durée d'irrigation et les quantités d'eau à mobiliser. En effet, elle dépend d'un réseau d'irrigation aujourd'hui vieillissant, ce qui inquiète de nombreux agriculteurs. La remise en état de cette infrastructure est perçue comme une priorité absolue. Cependant, l'accès à l'eau de ce réseau diffère fortement par rapport à la Gruyère. En Entremont, la facturation de l'eau se fait à la surface et non au volume d'eau utilisé ce qu'il fait qu'il n'y a pas d'incitations économiques :

Après, ben, faut quand même profiter du moment que les parcelles sont desservies. Il ne faut quand même pas se plaindre de devoir aller s'en occuper, quoi. Mais c'est clair que c'est du job... Après, qu'on emploie ou qu'on n'emploie pas l'eau, la facture d'irrigation, on la paye au mètre carré. Donc, c'est 0,009 centime par mètre carré. Alors, autant l'employer. (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

Ce système soulève cependant des tensions quant au partage équitable de la ressource. En période de sécheresse, des tournus sont mis en place : certaines zones ont alors accès à l'irrigation, tandis que d'autres doivent patienter. Il s'agit là d'un retour à une pratique ancestrale, autrefois largement utilisée pour gérer collectivement l'eau. Ce fonctionnement met cependant en lumière les limites de la gestion collective actuelle, jugée non viable à long

terme, d'autant plus si certains usagers exploitent de manière excessive cette ressource commune. Les témoignages concordent sur un autre point critique : la durée excessive des irrigations par parcelle. En l'absence de restrictions, les temps d'arrosage s'avèrent souvent trop longs, ce qui génère des pertes par ruissellement et appauvrit progressivement les sols, notamment dans cette région au substrat très caillouteux :

Et après, l'impact négatif aussi de cet arrosage, c'est qu'en laissant des tournus de 12 heures, c'est trop long. Donc le terrain, à terme, il se lessive, il y a du ruissellement et puis il se lessive. Donc, dans nos terrains par ici qui sont très caillouteux, je pense qu'en faisant des photos de terrain par terrain tous les dix ans, tu vas voir beaucoup plus ressortir les cailloux au fil du temps. Pour faire des tournus raisonnables, il faudrait faire, je ne sais pas, toi tu as peut-être étudié, mais peut-être qu'au bout de 6 heures temps, ton jet, il aura assez tourné pour amener tes 30 mm ou 25 mm d'eau. Mais ça, j'en sais rien. La théorie, c'est plus de faire plus d'arrosages par petite quantité que de faire des gros arrosages. Mais le travail est énorme si tu dois déplacer à 6 heures le matin, à 13 heures, à 18 heures, puis pendant la nuit ; tu ne fais plus que ça. (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025)

Le temps d'irrigation constitue un défi majeur pour les agriculteurs entremontants interviewés. Tous s'accordent à dire que les durées actuelles d'arrosage sont trop longues et dépassent largement la capacité hydrique des sols. Pourtant, le problème ne se limite pas à la technique : il touche également à la disponibilité en temps et en main-d'œuvre. En effet, irriguer selon les besoins réels des plantes, en respectant la rétention hydrique des sols, nécessiterait des interventions plus fréquentes, mais plus courtes. Cela impliquerait une augmentation considérable du travail, alors même que celui-ci est déjà conséquent. L'un des exploitants estime d'ailleurs que, lors des années de sécheresse, ce travail d'irrigation peut atteindre jusqu'à 300 heures.

Ainsi, pour irriguer de manière raisonnée, les différents exploitants mettent en avant la nécessité de moderniser les infrastructures. Une irrigation rationnelle passe, selon eux, par la mise en place de réseaux automatisés, ou du moins pilotables à distance. Le projet ODILE³⁸, mentionné à de nombreuses reprises lors des entretiens, illustre cette volonté. L'objectif, en plus de vouloir diminuer le temps de travail des agriculteurs est aussi de réduire le temps d'irrigation. Ceci dans le but, d'une part de mieux valoriser la ressource en eau pour optimiser les rendements fourragers et d'autre part de limiter les effets négatifs d'une irrigation excessive, tels que l'érosion, la fragilisation des sols et la perte de résilience des plantes. En effet, plusieurs agriculteurs soulignent qu'un usage trop systématique de l'eau peut rendre les parcelles moins résilientes. Certaines, habituées à des apports constants, réagissent mal lorsqu'elles sont temporairement privées d'irrigation. Samuel, par exemple, partage cette réflexion :

³⁸ Accessible sur <https://blueark.ch/wp-portfolio/odile/> (consulté le 08.08.2025)

Puis nous, on essaie déjà de ne pas sur-arroser. Parce qu'on essaie vraiment que les plantes essaient de se démerder un max. D'ailleurs, nous, on a regardé le système racinaire. Il est des fois le double du pré d'à côté qui fait que d'être arrosé. Parce qu'en fait, elles cherchent à fond à aller en bas chercher de l'eau. Alors que celui qui arrose à boulets, la racine reste en surface. Mais il suffit qu'une fois, qu'il n'arrose pas en été parce qu'il n'a pas le temps ou je ne sais pas quoi pour que les plantes pètent parce qu'elles ne sont pas habituées à aller chercher de l'eau. Puis je pense qu'il faut gentiment arrêter d'aller dans le sens, de dire que dès qu'il fait sec, on arrose. Parce qu'au bout d'un moment, il n'y aura plus en haut. Et puis voilà, autant s'y préparer maintenant. (Samuel, comm. orale, mai 2025).

Il ajoute même, sur un ton ironique : « D'ailleurs, j'ai dit à des paysans d'aller essayer d'arroser le barrage des Toules, que peut-être que ça pousse... » (Samuel, comm. orale, mai 2025). À travers ses propos, Samuel met en garde contre l'irrigation « réflexe », appliquée systématiquement dès que la sécheresse se profile. Il plaide au contraire pour une irrigation mesurée, ciblée sur les besoins réels des plantes.

La question de l'irrigation est alors à double tranchant : doivent-ils continuer d'irriguer et augmenter les stocks d'eau pour pallier aux sécheresses plus importantes ? Dans ce cas, cela signifie de revoir les réseaux d'irrigation, de les remettre en état s'ils existent et de revoir potentiellement le partage de la ressource. Ou doivent-ils aussi se préparer au fait qu'il n'y aura pas forcément toujours des stocks d'eau et laisser la nature à la nature en se focalisant sur des espèces plus résistantes ? La question de la pérennité des pratiques est ainsi secouée entre intensification et extensification.

Ces débats traduisent un dilemme plus profond entre deux visions agricoles. L'une, tournée vers l'intensification, vise la sécurité alimentaire par l'optimisation de l'exploitation des ressources. L'autre, davantage axée sur la résilience, cherche à préserver le paysage, la biodiversité et les ressources naturelles. Ce tiraillement, bien présent dans les entretiens, reflète les tensions actuelles au sein de l'agriculture helvétique.

Gestion de la forêt

La gestion de la forêt représente un enjeu crucial pour les agriculteurs, en particulier dans les alpages, où la pression est forte. En plus de la montée progressive de la limite supérieure de la forêt, phénomène constaté par plusieurs exploitants, l'embroussaillage s'intensifie en cas de déprise agricole ou de manque d'entretien régulier. Cette dynamique contribue à la diminution progressive des surfaces agricoles utiles (SAU), grignotées par l'expansion forestière, notamment en altitude.

Deux techniques sont utilisées par les exploitants afin de combattre l'avancée de la forêt : d'une part, un entretien manuel réalisé directement par les exploitants, mais qui demande une charge de travail considérable ; d'autre part, l'utilisation d'animaux pour maintenir une pression sur la végétation. Les chèvres, notamment, sont reconnues pour leur capacité à limiter la repousse des jeunes ligneux. Elles jouent alors un rôle de "jardinières naturelles". Cependant, dès que les ligneux gagnent en hauteur et en densité, seule une intervention humaine peut être efficace.

Or, ces travaux d'entretien, bien que nécessaires, sont coûteux en temps, en énergie, en main-d'œuvre et en matériel. Cela limite fortement les capacités d'action des exploitants, surtout sur les terrains difficiles d'accès. À cela s'ajoute un cadre législatif perçu comme défavorable. En effet, une fois qu'une parcelle est jugée trop embroussaillée et classée comme forêt, il devient très difficile d'y intervenir, ne serait-ce que pour abattre quelques arbres, tant administrativement que légalement. Ce point a été dénoncé à plusieurs reprises lors des entretiens : beaucoup estiment que la forêt bénéficie d'un niveau de protection trop élevé, au détriment des surfaces agricoles, qui ne cessent de reculer d'année en année. Les procédures liées à la législation forestière, jugées complexes et restrictives, freinent ainsi les perspectives d'entretien futur des terrains marginalisés ou peu accessibles. Cette rigidité administrative renforce le sentiment d'impuissance face à une dynamique d'embroussaillage jugée préoccupante :

Pour la petite histoire, moi, ça fait deux ans que je me bagarre avec l'ingénieur forestier. Malheureusement, pour accéder à une de mes parcelles, je dois passer sur une parcelle voisine, mais l'exploitant en question refuse qu'on passe dessus. Et puis, j'ai demandé au garde forestier pour passer sur la forêt. Et puis, lui, il m'a dit, « oui, c'est bon, mais il faut regarder avec l'ingénieur forestier ». Et l'ingénieur forestier, il a dit : « Non, non, c'est hors de question, vous ne passez pas là. Vous devez ouvrir un procès civil pour passer sur le terrain du voisin. » Alors, un procès civil, ça prend 3, 4, 5 ans et ça coûte 15 000 francs. Pour aller piocher un peu d'herbe là-bas derrière. Je suis fou de rage après cette équipe. Parce qu'on voit chaque deux jours dans les journaux, qu'il faut maintenir la biodiversité. Il faut éviter que les forêts, elles, gagnent sur des terres agricoles. Il y a chaque année 1 000 hectares de terres agricoles qui disparaissent dans le canton du Valais par l'emprise de la forêt. Alors, ils mettent sur leur site internet que c'est urgent d'agir par des mesures ciblées. Le Grand Conseil, ils ont voté 300 000 francs de budget au mois de décembre pour prévenir l'embuissonnement des terres agricoles. Là, on a un cas de figure concret, où j'ai 6 000 m² de terrain en propriété exploitable. J'ai besoin de 120 m² pour passer sur une parcelle que j'ai moi en propriété. On a encore mandaté un ingénieur forestier pour lui présenter une solution. Ils refusent tout ce qu'on propose, tout, de A à Z (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

Ainsi, la confiance concernant le maintien des parcelles agricoles s'effrite peu à peu. De nombreux exploitants considèrent la forêt « comme de la forêt », être intouchable, inébranlable et impénétrable. « Demande à un garde forestier s'il n'y a pas d'inconvénients si on met quelques centaines de chèvres dans la forêt... » (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

La forêt représente un lieu ambivalent : entre réserve naturelle, protection contre les dangers naturels et menace pour les terres agricoles. Face à cette pression, les outils actuels paraissent dépassés, tant sur le plan technique qu'administratif. Il s'agirait ainsi de pouvoir lutter contre la progression de la forêt afin de maintenir les terres agricoles.

Maintien des alpages

Les alpages apparaissent comme de véritables oasis pour les exploitants agricoles. Ils concentrent une grande quantité de fourrage tout en portant une forte valeur patrimoniale, qu'elle soit culturelle, paysagère ou liée aux productions emblématiques comme les fromages d'alpage AOP. C'est notamment le cas en Gruyère, avec le Gruyère d'alpage AOP et le Vacherin fribourgeois AOP, ou en Entremont avec le Raclette du Valais AOP. La quasi-totalité des personnes interrogées s'accordent sur l'importance de maintenir ces zones d'estivage, tant pour leur rôle agronomique que pour leur valeur paysagère et culturelle.

Cependant, une voix nuance cette position. Les conditions de travail en alpage, souvent exigeantes, combinées à une charge physique et logistique importante, font peser un risque réel d'abandon de ces espaces. Et pourtant, leur rôle dans la gestion globale des exploitations reste central : ils offrent en moyenne une centaine de jours pendant lesquels les troupeaux sont éloignés de la ferme, permettant ainsi de soulager les parcelles de plaine et de concentrer la production de stocks hivernaux sur ces dernières. Une réduction de la durée d'estivage, ou la non-montée des bêtes en alpage, impliquerait de prélever davantage de fourrage sur la surface agricole utile proche de la ferme, fragilisant la pérennité des réserves hivernales. Par ailleurs, le stress hydrique est souvent plus important pour les animaux restés en plaine l'été, soulignant ainsi le rôle crucial des alpages pour leur bien-être et une meilleure gestion des troupeaux.

Les alpages jouent aussi un rôle essentiel dans l'équilibre écologique des zones de montagne. En maintenant une pression de pâturage modérée sur les milieux alpins, ils limitent l'embroussaillage des espaces sous-exploités et préviennent la surexploitation d'autres zones plus accessibles. Une gestion déséquilibrée, avec concentration du bétail sur les mêmes parcelles ouvertes et abandon des zones plus difficiles d'accès, entraîne une double perte : érosion et dégradation d'un côté, reforestation spontanée et fermeture du paysage de l'autre. De plus, cela permet de mettre une pression sur les environnements alpins afin d'éviter la pression de la végétation de la lande tout en évitant la surexploitation de certaines parties. Sinon certaines régions seraient surexploitées, accentuant l'érosion, et les régions sous-exploitées seraient embuissonnées, comme l'explique Samuel :

Du coup, en fait, ce serait un double autogol, enfin ce serait un autogol parce que tu te dis, les belles parcelles ouvertes, bah elles surexploitent, puis, après, je pense que ça dégrade quand même l'endroit, puis l'endroit où il faudrait mettre une pression, bah, y'a pas de pression, du coup c'est la forêt qui prend le dessus quoi. (Samuel, comm. orale, mai 2025).

4.3.2.2 Modifier la gestion pour s'adapter aux conditions climatiques

La phénologie est avancée et la tendance indique que ce phénomène va se poursuivre. Ainsi, la durée de la saison de végétation semble s'allonger et les parcelles pourraient atteindre leur maturité plus rapidement. Cependant, comme le montrent les cartes, les vallées alpines risquent de connaître des changements climatiques majeurs selon les scénarii et le temps, ce qui est moins marqué dans les zones basses des Préalpes. De manière générale, les cartes

illustrent une gradation des conditions dans les vallées internes : les conditions actuelles des cultures gagnent en altitude, occupant les zones aujourd'hui dédiées aux prairies, qui elles-mêmes s'étendent sur les pâturages, tandis que les pâturages progressent vers les alpages.

La première envie des agriculteurs est en premier lieu de maintenir les conditions actuelles, comme vu dans le point précédent. Cependant, les interviews ont aussi mis en évidence la nécessité de changement potentiel au niveau des parcelles, de la taille et le type de cheptel, des surfaces agricoles ou de la mécanisation.

Agroécologie

Les forêts semblent être une charge supplémentaire. Mais certains voient aussi l'importance écologique que peuvent avoir les arbres et la forêt, notamment pour lutter contre les effets du réchauffement climatique et avoir une influence positive sur les températures, les sécheresses ou encore le bien-être animal.

La mise en place de pâturages boisés ou encore de projets agroforestiers pourrait être une solution envisagée pour pallier les effets du changement climatique. Ces systèmes intégrés pourraient offrir de multiples avantages comme de l'ombrage pour les animaux, réduction de l'érosion, maintien des stocks d'eau, production de fourrages supplémentaires ou encore diversification des revenus agricoles. Cette idée est largement soutenue par Samuel, qui y voit une réponse à la fois écologique et pragmatique :

Oui, ce serait intéressant de voir aussi, parce que je me pose souvent la question, en voyant toutes ces prairies sèches et ces pâturages secs... On voit souvent quand même où il y a des grands arbres à haute tige, tu sens que c'est moins vilain déjà, tu vois ? Déjà sous les arbres, il y a déjà beaucoup plus d'herbes, et puis tu te dis s'il ne faudrait pas lancer un projet agroforestier, et puis aller par bandes, et puis tu te dis, couper ce sec, couper ce... Je pense qu'il faudrait aller dans ce sens, dire alors plus d'arbres, et pas planter des arbres pour planter des arbres. À l'époque où il y avait tous ces murs en pierre qui sont tous en train de se casser la gueule, tu planterais des arbres, puis ça protégerait toutes les bandes, et puis t'arriverais à faire du foin, peut-être que ça retiendrait le sol s'il y a des fortes pluies, et je pense que ça pourrait être bien, ça. D'aller peut-être dans ce sens. Je ne sais pas après, ce n'est peut-être pas une bonne idée. Dire aux vieux qu'on va planter des arbres, on va se faire tuer. Mais je pense que... Et puis tu vois, en plus, quand on a des chèvres, quand tu vas tailler les arbres, pour pouvoir passer soit la faucheuse, c'est du potentiel fourrage, parce que les chèvres adorent les feuilles. En période sèche, l'arbre peut-être qu'il résisterait plus, ils ont quand même un apport en nourriture. Si l'herbe sèche, ils ont quand même des feuilles. La chèvre, ça vient des pays hyper secs, c'est un animal hyper adapté (Samuel, comm. orale, mai 2025).

L'intégration des arbres dans les systèmes agricoles pourrait ainsi favoriser la création de nouveaux écotones, renforçant la résilience face aux aléas climatiques et à l'expansion forestière. Toutefois, cette transition impliquerait une transformation des pratiques. Comme le souligne Samuel, il ne s'agit pas tant d'un surcroît de travail que d'un travail différent :

La gestion, je pense, ça serait quand même un peu différente. Après, c'est dur à dire... Est-ce que ça te prend plus de temps d'aller arroser une parcelle nue ou bien d'aller couper deux branches au printemps et puis couper un arbre de temps en temps parce qu'il est mort ou bien qu'il a pété avec la neige ou tu vois ? Ce serait un boulot différent, en fait (Samuel, comm. orale, mai 2025).

Modification sur les parcelles : type de code culture et temporalité

Les projections climatiques mettent en évidence une gradation progressive des conditions de croissance en fonction de l'altitude. Dans ce contexte, l'avancement de la saison végétative pousse les agriculteurs à repenser leur utilisation des terrains et le tournus des cultures, afin de limiter les effets du stress hydrique en période estivale. L'objectif est clair : produire un maximum d'herbe fraîche, riche en protéines et en sucres, pour les bovins. Cette herbe, de meilleure qualité nutritionnelle, permet non seulement d'assurer la santé du troupeau, mais aussi d'améliorer la qualité et la quantité de lait produit. Dès lors, la question centrale devient celle du choix des types de gestion (*codes cultures*) mais aussi du calendrier d'intervention : trouver le juste équilibre entre rentabilité et qualité fourragère, en s'adaptant aux conditions climatiques changeantes.

Dans ce domaine, les deux agriculteurs bio de Gruyère, qui disposent de cultures en plus de l'élevage, soulignent l'importance de choisir le bon moment pour semer. L'enjeu est de planter dans une terre suffisamment chaude pour garantir une germination rapide, tout en évitant les risques de gel printanier ou de sécheresse estivale au stade fragile de la plantule. Semer trop tôt ou trop tard devient risqué dans un climat de plus en plus instable. Toutefois, ces nouvelles conditions pourraient aussi représenter une opportunité. Le réchauffement progressif et l'allongement de la saison de croissance ouvrent potentiellement la voie à de nouvelles cultures, ou à un développement plus favorable des cultures existantes, à condition que les contraintes hydriques et techniques puissent être surmontées, comme soulevé par Pascal :

Les cultures montent, c'est clair, avec cette altitude. Voilà, il faut profiter de la seule chose positive. Ça veut dire qu'on a une grande chance, c'est qu'il y a moins d'attaques d'altises, de méligèthes, parce qu'on est encore en dehors des ondes de grandes cultures. On peut profiter, à un moment, je ne sais pas jusqu'à quand, de cette chance de l'augmentation de température pour faire des cultures en dehors des zones qui étaient prévues au départ, entre guillemets (Pascal, comm. orale, mai 2025).

Ainsi, de nouveaux terrains pourraient devenir propices à l'implantation de cultures céréalières ou d'autres types de production végétale, en particulier dans les vallées. Dans certains cas, ces cultures pourraient même remplacer des prairies actuellement en place, ce qui soulève des questions fondamentales sur l'évolution des systèmes de gestion agricole. Une telle transformation impliquerait en effet l'introduction d'un nouveau type d'agriculture dans des exploitations déjà bien établies, notamment dans les vallées internes, que ce soit en Entremont ou dans les Préalpes gruériennes. Cette perspective n'est toutefois pas accueillie avec un enthousiasme unanime, notamment au niveau de la pénibilité du travail. Un agriculteur entremontant met en garde contre une autre limites de cette évolution :

Si on change de type de culture, on change toute notre manière de faire ici dans la région. Parce que de nourrir des bovins sans produire du fourrage, je ne dis pas que c'est impossible, mais à mon avis très compliqué. Alors là, ça veut dire qu'on remet en question tout. Et puis, ce qu'il faut être conscient, c'est que dans nos zones de montagne, il y a un tas de surfaces qui ne sont de toute façon pas valorisables sans faire passer des animaux dessus (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

Les cultures pourraient également être destinées à l'alimentation humaine, renforçant ainsi le pilier de la souveraineté alimentaire. Mais une telle réorientation impliquerait un bouleversement encore plus profond des habitudes agricoles, comme le soulève Mélanie :

Après ça, je peux parler pour moi, parce qu'on est en montagne, mais on a bien sûr en Suisse besoin de produire des denrées alimentaires pour alimenter la population. Est-ce que les légumineuses, à Praz-de-Fort, ça peut être un objectif, c'est une question à soulever ? Est-ce qu'au lieu des prairies, on met d'autres cultures qui peuvent nourrir l'homme ? C'est une bonne question, mais il faudra de toute façon nourrir nos animaux. Surtout qu'on est vraiment une région qui est propice à l'élevage de bovins, dû à notre topographie (Mélanie, comm. orale, mai 2025).

Développer des cultures peut être une solution mais ceci passe par une remise en question des conditions agricoles actuelles : Diminuer la charge animale ? Utiliser des parcelles pour agrémenter l'alimentation animale par des céréales ? Créer des aliments maison ? Ajouter de la résilience quant au changement climatique ? Pour l'un des exploitant bio, la polyculture est la clef de la résilience :

Diversifier ses revenus : faire du bétail, des cultures. Je trouve que c'est quand même primordial. Polyculture, élevage, ils appellent ça en France. Parce que s'il y a des cultures qui iraient mal une année, il y a toujours l'élevage qui peut un peu éponger le mal de l'autre et inversement. Ça, c'est vrai qu'il faut quand même diversifier et ne pas rester dans un truc spécifique. Avoir 100 vaches et 50 hectares et puis matraquer comme un cochon... Il fait un coup de sec et puis tu n'as plus rien à leur donner. C'est vrai qu'il faut diversifier et être autosuffisant (Un agriculteur gruérien, comm. orale, 2025).

L'évolution des conditions climatiques ouvre indéniablement des opportunités pour diversifier les pratiques agricoles, notamment par l'introduction ou l'extension des cultures céréalières en altitude. Cependant, cette transformation ne peut se réduire à un simple ajustement technique. Elle implique une remise en question profonde des systèmes d'exploitation actuels, particulièrement dans les zones de montagne où l'élevage reste central. La polyculture apparaît comme une stratégie clef pour renforcer la résilience face aux aléas climatiques, en diversifiant les sources de revenus et en assurant une certaine autonomie alimentaire. Néanmoins, sa mise en œuvre reste conditionnée par des contraintes locales fortes, telles que la topographie, la qualité des sols, la multiplication des équipements ou encore les savoir-faire traditionnels. Ainsi, toute adaptation devra s'appuyer sur une approche territorialisée, intégrant à la fois les potentialités offertes par le climat et les réalités socio-économiques des exploitations.

Ensuite, l'adaptation des pratiques agricoles face aux changements climatiques soulève des enjeux complexes, tant sur le plan agronomique qu'organisationnel. Si l'allongement de la saison de végétation offre de nouvelles opportunités pour la production fourragère, il impose aussi une remise en question profonde des calendriers traditionnels et des modes de gestion des parcelles. Les agriculteurs se retrouvent confrontés à un dilemme : maintenir les pratiques héritées, gages de stabilité et de sécurité, ou s'engager dans une transformation de leur gestion pour anticiper les nouvelles réalités climatiques. Cette tension se manifeste notamment dans la gestion des prairies avec les dates de fauche, où la rapidité de pousse de l'herbe oblige à avancer les interventions, parfois en contradiction avec les cadres légaux ou les recommandations agronomiques visant à préserver la biodiversité. Ce cas est particulièrement intéressant dans les régions d'Entremont et dans les zones de montagne en Gruyère où les législations sont plus strictes. Mélanie met d'ailleurs ce point en valeur :

Déjà maintenant, par rapport à il y a 30 ou 40 ans en arrière, il y a du changement. En tout cas, toutes les personnes un peu plus âgées me disent « Mais vous êtes malades, vous fauchez beaucoup trop vite. » Mais le problème, c'est que les prés, les foin sont prêts plus vite. C'est une réalité, on ne peut pas le mentir. Après, ils disent tout le temps qu'il faut laisser réensemencer le terrain pour que chaque année, y a tout le temps une culture de graines. Sauf que pour produire du fourrage de haute qualité pour nos bovins, pour produire du lait, il faut du sucre. Pour avoir du sucre, il faut faucher rapidement. Et c'est là qu'on voit des contradictions entre être intensif et être extensif. Donc je comprends qu'il faut réensemencer notre pré, mais est-ce qu'on a vraiment besoin, chaque année, de réensemencer notre pré ? Puis après, on réensemence notre pré avec ce qu'on a sur le prés. Est-ce que ce que t'as sur le pré, c'est ce que tu souhaites ? C'est aussi ça, la question. La composition botanique est une grande question pour moi et ça dépend tout de l'utilisation agricole que tu as, tu vois ? (Mélanie, comm. orale, mai 2025).

L'ajustement des dates de fauche apparaît comme une adaptation incontournable pour les agriculteurs confrontés à des prairies prêtes plus tôt et à des épisodes de sécheresse plus fréquents. Avancer les fauches par rapport aux bases légales devient une nécessité pragmatique, mais cette adaptation soulève plusieurs enjeux. D'une part, le décalage des interventions peut entrer en contradiction avec les réglementations actuelles, souvent conçues pour des conditions climatiques passées et moins variables. D'autre part, la stagnation estivale de la pousse herbagère pousse certains exploitants à envisager une modification du nombre de fauches. Ces ajustements modifient l'intensité des pratiques et peuvent avoir des répercussions sur la qualité du fourrage ainsi que sur la composition botanique des prairies. Mélanie explique :

Mais la composition botanique, l'utilisation extensive ou intensive de nos parcelles, est-ce qu'on doit continuer à exploiter intensivement certaines parcelles, ou bien est-ce qu'on doit plutôt tirer sur l'extensif ? C'est un peu difficile à dire. On a besoin aussi de cette composition botanique pour la qualité fourragère de nos fourrages. Et pour l'instant, ça marche très bien. Mais on sait qu'à l'avenir, ça va être toujours plus dur de faire des fourrages de qualité avec peu d'eau (Mélanie, comm. orale, mai 2025).

La recherche d'un équilibre entre réactivité face au climat, respect des cadres légaux et maintien de la biodiversité devient alors un exercice délicat. Est-ce que le territoire se scindera entre des montagnes extensives et des vallées intensives ? Est-ce que la production de montagne ne sera plus qu'extensive ?

Ces réflexions sur la gestion des prairies révèlent une tension persistante entre intensification et préservation, entre adaptation rapide et respect des cycles naturels. Mais cette tension ne se limite pas aux seules parcelles de fauche. Elle se prolonge également dans les zones de pâturage, où la gestion temporelle et spatiale du bétail devient tout aussi stratégique face à des conditions climatiques en mutation. Car si la fauche doit s'adapter, la mise en pâture aussi : dans les deux cas, il s'agit de repenser les rythmes de production pour maintenir l'équilibre entre autonomie fourragère, qualité nutritionnelle et durabilité des systèmes. En effet, si la période végétative est plus longue, la date de sortie des fermes est avancée, réduisant les besoins en foin dans la ferme. Cependant, de nombreux agriculteurs entremontants se demandent si les différentes parcelles de pâture auront assez d'herbage en automne. Car « si durant l'été, on n'a pas d'apport d'eau, l'automne, on n'a aucun fourrage sur ces parcelles » (Mélanie, comm. orale, mai 2025). Ainsi la question se pose encore de la possibilité de mettre les animaux en pâture durant l'automne par manque de fourrage ou s'il faut les rentrer à la ferme et commencer à utiliser les stocks hivernaux.

Une autre technique pratiquée actuellement consiste à pâturer de manière tournante plusieurs pâturages, en limitant ainsi la transformation rapide de l'herbe en foin ou son affaïssement, ce qui permet de préserver ses qualités nutritives. Si cette méthode était étendue à une plus grande échelle, elle offrirait une surface supplémentaire susceptible d'être fauchée une fois que le bétail serait monté à l'alpage. Cependant, cette approche soulève de nouveau la question de l'accessibilité des parcelles et de la logistique liée au déplacement des troupeaux, qui reste un défi important.

Par ailleurs, les projections climatiques indiquent que les conditions actuelles favorables aux pâturages se déplacent progressivement vers les zones actuellement occupées par les alpages. Les agriculteurs, en analysant ces cartes, observent cette gradation qui influence non seulement la temporalité de la croissance de l'herbe, mais entraîne également la nécessité de repenser la rotation entre pâturages et alpages, avec des calendriers adaptés à ces nouvelles dynamiques :

Les alpages, ils ont tendance à être prêts plus tôt mais après c'est le même phénomène que sur une prairie ici. Le problème qu'il y a, c'est qu'il y a des interruptions de croissance de végétation à cause de ces sécheresses, principalement des sécheresses. Alors je pense que dans l'ensemble, le nombre de jours d'estivage réel qu'ils arrivent à faire, il est assez stable. Et puis peut-être que certaines années, le fourrage, le stade de végétation, ils seraient prêts pour pouvoir alper les bêtes un peu plus tôt mais ils ne le font pas forcément parce que par crainte d'avoir un manque encore après. Le stade de la prairie, ils seraient prêts à amener des bêtes sur l'alpage une semaine avant la date réelle où ils montent mais ils ne le font pas forcément par crainte d'avoir un manque de fourrage à cause d'une sécheresse quelque temps après (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

Afin de pouvoir rester toute la période estivale en alpage, un exploitant gruérien a mis en place une stratégie d'adaptation bien spécifique : pâturer de manière ciblée certaines zones, augmenter le nombre de rotations et réduire le nombre de bêtes présentes sur l'alpage. En effet, la capacité d'un alpage est calculée en fonction des unités de gros bétail (UGB), avec une norme fixée à 100 jours de pâture par UGB. Toutefois, cette durée n'est pas impérative : si la pression animale est réduite, le temps de présence peut être allongé, tout en respectant la capacité des pâturages.

Ce mode de gestion permet ainsi de prolonger la durée d'estivage, tout en préservant les ressources disponibles à l'alpage. Cela libère également les zones de plus basse altitude, qui peuvent alors être davantage mobilisées pour la production de stocks fourragers destinés à l'hiver. Cette méthode, déjà mise en œuvre en Gruyère, pourrait également être envisagée en Entremont, au fur et à mesure que ces conditions thermiques se rapprocheront de celles observées actuellement dans les Préalpes.

Modification du type et de la taille de cheptel

Le nombre et le type de bétail est aussi une mesure d'adaptation au changement climatique qui a longtemps été discutée lors des interviews, notamment en ce qui concerne les ressources. La question soulevée était ainsi de savoir si le bétail agricole actuel sera toujours adapté aux conditions climatiques futures :

Trouver un autre type de bête qui mange, je ne sais pas, des dromadaires qui se satisfont d'herbe meilleure et sèche. Après, comment avoir une production laitière ou même de viande si la ressource n'a plus de qualité et n'est plus disponible ? Ce ne sera plus que de l'entretien. Dans les cas les plus graves, quoi» (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

En effet, les vaches laitières, principaux animaux de ces deux régions sont gourmandes en eau ainsi qu'en fourrage, notamment à cause de leurs production laitière. Dans un cas où les accès à ces deux différentes ressources seraient réduits, la question de la pérennité de ces troupeaux questionne fortement une grande majorité des agriculteurs. Cependant, diminuer le nombre de vaches, moins les pousser au lait n'a pas le même rendement en lait. Les entremontants mettent ainsi en avant l'importance de revenus secondaires tels que la vente directe et tous les agriculteurs appuient l'importance des labels AOP qui rémunère de manière plus importante leur travail. Cependant, au vu des attaches émotionnelles des agriculteurs aux bovins, l'idée de changer de type d'animaux est très complexe, bien que potentiellement plus rentable. De plus, ceux-ci sont amplement conscients du bienfait des bovins sur la région au niveau de la fumure qu'ils amènent, de l'entretien du paysage qu'ils opèrent.

Ainsi, plutôt que de changer d'espèce, la majorité des agriculteurs envisagent de réduire la taille de leur cheptel, voire de changer de race au sein des bovins, à condition qu'une forme de compensation économique soit assurée. Sur ce point, une légère distinction émerge entre les deux régions. Les agriculteurs gruériens interviewés mettent davantage en avant la réduction du cheptel, alors que les enquêtés entremontants nuancent ce point avec l'importance de races plus rustiques et moins exigeantes. Ainsi, les interlocuteurs valaisans ont mis en avant certaines races telles que les Hérens, emblème valaisan, mais aussi les

Highlands, les Grises rhétiques ou encore les Gervaises qui sont plus rustiques et moins demandeuses en ressource que des Holstein ou autres vaches laitières. Deux agriculteurs ont cependant appuyé l'importance de se tourner vers les races autochtones telles que les Hérens qui par définition sont adaptées aux montagnes et au climat valaisan. De plus, leur légèreté fait que ces races peuvent facilement se déplacer et aller dans des endroits pentus avec moins de difficulté que d'autres races. D'ailleurs, certaines génisses Hérens peuvent monter jusqu'à des altitudes très hautes lors de l'estivage, pouvant atteindre jusqu'à 2600 mètres selon Mélanie. Elle met cependant en garde que la hiérarchie du troupeau doit être bien installée.

La question d'un bétail mieux adapté aux conditions locales revient fréquemment dans les entretiens. Elle s'accompagne d'une réflexion plus large sur la mixité de l'élevage, une approche dans laquelle la ferme est perçue comme un écosystème intégré, où chaque espèce animale joue un rôle spécifique. À l'image de la polyculture, cette diversification dans l'élevage est perçue comme un levier de résilience, tant face aux aléas climatiques qu'aux pressions sanitaires. Elle permet, entre autres, une meilleure gestion des parasites, tout en valorisant de manière complémentaire les ressources végétales : chaque espèce ayant ses préférences alimentaires, les interactions entre animaux et végétation deviennent plus équilibrées. Cette approche invite ainsi à repenser les systèmes d'élevage non pas uniquement en termes de production, mais comme des ensembles agroécologiques complexes, à la fois adaptatifs et multifonctionnels :

Les ânes vont s'acharner sur certaines plantes puis d'autres, ils vont moins les toucher. Alors, si tu alternes, tout le monde mange ce qu'il veut. Mais au final, le pâturage il est mieux nettoyé. Parce que les chèvres, elles mangent plutôt en hauteur. Les moutons, ils arrivent aussi à trier le meilleur, enfin que de ce qu'ils veulent, le cheval encore plus. Et la vache, s'il y a la fleur au milieu mais qu'il y a du nard raide autour, ben elle risque de aussi manger le nard raide parce qu'elle veut la fleur, mais... Ouais, alterner je pense c'est bien. Ouais. Mais après c'est une autre gestion, c'est une gestion de fou en fait. Quand t'as toutes ces espèces, ben c'est le casse-tête des parcs, t'as toujours... nous on a en permanence 5-6 troupeaux quoi. Niveau gestion, ce n'est pas facile aussi (Samuel, comm. orale, mai 2025).

Dans les régions particulièrement exposées aux effets du changement climatique, où l'accès à l'eau et au fourrage pourrait devenir encore plus restreint, plusieurs agriculteurs envisagent de prendre d'autres petits ruminants en plus de leurs bovins, tels que les chèvres ou les moutons, selon leurs affinités et les spécificités de leur exploitation. Ces animaux présentent l'avantage de pouvoir valoriser des terrains autrement peu exploitables, notamment les pentes abruptes ou les hautes altitudes.

Samuel, éleveur entremontants, illustre cette capacité d'adaptation en mentionnant que ses chèvres montent jusqu'au sommet du Rogneux, à 3 084 mètres d'altitude. Pour lui, toute stratégie d'adaptation devrait commencer par une lecture fine du terrain, et le choix des animaux devrait se fonder sur leur aptitude à tirer parti des conditions locales, plutôt que sur leur rendement seul. Il insiste sur le fait que la capacité d'un animal à s'adapter à son environnement doit devenir un critère central dans les choix d'élevage à venir :

Pis les bêtes, ça doit être un critère de sélection aussi, qu'elles arrivent à se dépatouiller avec ce qu'elles ont. De ne pas vouloir à fond compléter. Quand tu as des bêtes en alpage et que tu les complètes à fond avec de l'aliment, je trouve que c'est un non-sens. Peut-être financièrement, c'est bien, mais je trouve que c'est con. Elles devraient réussir à t'apporter un minimum, mais toi, tu n'es pas obligé de les compléter à fond la caisse. Après, c'est sûr que celui qui aime les vaches à 50 litres ou celui qui aime des bolides de vaches allaitantes, il tirera un peu la gueule, mais je ne sais pas (Samuel, comm. orale, mai 2025).

Ce dernier témoignage traduit avec force la remise en question de modèles productivistes fondés sur la performance individuelle des animaux, au profit d'une vision plus systémique, enracinée dans les réalités du terrain. L'adaptation ne se résume pas ici à un simple ajustement technique, mais implique une transformation des représentations : ne plus concevoir l'animal uniquement comme un vecteur de rendement, mais comme un partenaire intégré à un écosystème agricole plus vaste.

Modification de la surface agricole

Les modifications apportées au cheptel ne représentent qu'une facette d'un large éventail de changements que les agriculteurs envisagent en réponse aux pressions climatiques grandissantes. Plus que les animaux eux-mêmes, c'est l'arrangement spatial et l'exploitation du terrain agricole qui sont remis en question. En effet, si les ressources (comme l'eau, le fourrage ou l'accès) deviennent plus rares ou moins prévisibles, la superficie disponible, sa distribution et sa valorisation deviennent des enjeux stratégiques majeurs.

A la vue des différentes cartes présentées, un élément est très visible : l'expansion des conditions climatiques favorable à certains *codes cultures*. Cependant, la plupart des agriculteurs ont trouvé ceci irréaliste pour plusieurs raisons. Pour commencer, les conditions favorables climatiquement pour les cultures seraient en région avec peu d'accès. Il s'agirait ainsi de se demander si la distance à l'exploitation est rentable ou non que ce soit en termes d'essence pour y accéder ou de temps, rendant le tout peu rentable et compliqué. La priorité reste à s'occuper des parcelles actuelles :

C'est se tuer pour rien. Si t'avais la possibilité d'aller faucher...T'en as pour 4 heures pour monter à pied avec ta faucheuse pour aller sur 200 mètres carrés. Bien sûr. Alors on se pète déjà assez le cul ici, sans aller plus haut se péter le cul plus loin (Cory, comm. orale, mai 2025).

Par ailleurs, les zones identifiées comme climatiquement favorables aux pâturages se situent majoritairement en milieu forestier. Or, ces espaces sont fortement protégés, ce qui rend leur reconversion agricole particulièrement difficile, voire inenvisageable selon la plupart des agriculteurs. En Entremont notamment, la présence de forêts de protection renforce cette contrainte, les exploitants soulignant également l'absence d'accès à ces zones ainsi que le rôle dissuasif joué par certains organismes de protection de la nature, qui limiteraient fortement toute possibilité d'extension. En Gruyère, cette problématique est moins prononcée, car la couverture forestière y est moins importante.

Concernant les terrains nouvellement disponibles à haute altitude, notamment dans les zones de retrait glaciaire, les agriculteurs reconnaissent qu'un pâturage de ces espaces pourrait théoriquement être envisagé. Cependant, les obstacles principaux résident dans le cadre réglementaire, notamment les autorisations requises et la pression des ONG environnementales, qui freinent tout projet d'exploitation.

Oui, mais les surfaces de glaciers qui reculent et puis ces zones qui sont colonisées par les petites plantes à haute altitude, ça va jamais produire des gros rendements. Et puis moi ce que j'ai peur, oui et non, il y a de toutes façons des organisations environnementales qui vont pas nous laisser aller avec des animaux dans ces zones. Moi je vois ça un peu comme ça. Ils cherchent déjà à prendre des portions de ce qu'on a déjà. Ils cherchent déjà à augmenter sur les surfaces d'alpages, de la concentration des gouilles d'ici, de ça, élargir des cours d'eau. Alors je vois difficilement comment on va pouvoir gagner de la surface avec la végétation qui monte en altitude. Puis de toute façon, des prairies qui produisent très très peu à cette altitude-là, le rendement là-haut [...] Le ratio me paraît démesuré pour qu'il y ait une quelconque rentabilité et puis déjà les autorisations (Un agriculteur entremontant, comm. orale, mai 2025).

L'extension des parcelles agricoles est alors vue par la plupart des agriculteurs comme quasiment impossible, à moins que « le peuple crève tellement de faim et que l'agriculteur va tellement mal par la météo, par l'environnement, que le gouvernement va se dire « ok on laisse rouvrir des surfaces » » (Mélanie, comm. orale, mai 2025).

En Gruyère, ce n'est pas tant le climat que l'urbanisation qui suscite le plus d'inquiétudes chez les agriculteurs. Pour plusieurs d'entre eux, ce phénomène est perçu comme un enjeu encore plus pressant que le changement climatique lui-même, tant ses impacts sur les terres agricoles sont immédiats et irréversibles :

Il y a des facteurs qui nous font plus peur que le climat. C'est, ouais, les constructions, la ville qui fait que ça grandit, qui pousse. Dans mon village, on est bien, mais on n'a pas la chance d'être encore vraiment le village agricole retiré. On voit bien que la ville, elle pousse. On voit bien les chantiers au bord de l'autoroute avec encore des gros périmètres. C'est des grandes surfaces qui vont disparaître à très court voire moyen terme, dans les 10 ans (Un agriculteur gruérien, comm. orale, mai 2025).

Ainsi, la perte des terres agricoles au détriment de la construction est très importante pour l'ensemble des exploitants, mais particulièrement pour les exploitants de Gruyère. La question d'artificialisation des sols, de la perte du potentiel nourricier et la localisation des constructions sur les plus belles terres arables du district soulève une véritable indignation, considérant qu'il s'agit de terres perdues dont les surfaces ne seront jamais retrouvées :

Puis eux, ils s'en foutent, ils massacrent tout. Il n'y a pas de limite. Ils construisent des terrains beaux, plats, fertiles, qui nourrissent la population. Vraiment, ce n'est pas des talus qui vont mal et puis qu'on ne peut rien faire avec. C'est vraiment les plus belles parcelles de Bulle et des environs qui viennent shooter (Un agriculteur gruérien, comm. oral, mai 2025).

Ainsi, même dans un contexte climatique évolutif, où certaines zones deviennent potentiellement plus propices à l'agriculture, les exploitants ne voient que peu de marge de manœuvre. Ce décalage entre ce que les cartes projettent et ce que les agriculteurs considèrent faisable souligne un point fondamental : l'adaptation ne dépend pas uniquement des conditions climatiques, mais aussi des dimensions politiques, foncières, institutionnelles et humaines.

Les améliorations techniques

Un dernier point soulevé par l'un des agriculteurs bio concerne les améliorations techniques. Pour les producteurs laitiers qui maintiennent leur bétail à la ferme tout au long de l'année, le gain de temps et la disponibilité en main-d'œuvre deviennent des enjeux majeurs, en particulier dans un contexte de changement climatique où davantage d'attention doit être portée à l'entretien des parcelles. Dans ce cadre, l'automatisation et les équipements performants permettent non seulement de compenser le manque de main-d'œuvre, mais aussi de libérer du temps pour d'autres activités essentielles comme la fauche ou la culture de céréales :

En tout, par année, on sème 70 hectares, en tout. Je le fais quasiment seul. Avant, il fallait être 2 ou 3, quoi. Il faut vraiment maximiser pour faire plus seul et puis avoir des machines vraiment performantes à 100%, quoi (Un agriculteur gruérien, comm. orale, mai 2025).

5. DISCUSSION

Les analyses en composantes principales (ACP) ainsi que les analyses multidimensionnelles non métriques (NMDS, *Non-metric Multidimensional Scaling*) réalisées sur les données agricoles et climatiques des deux régions étudiées (Entremont et Gruyère) mettent en évidence des différences marquées dans la répartition des types de gestion des terres et confirment que les gradients climatiques (température, précipitations) influencent fortement la distribution des différents modes de gestion agricole. Combinées aux données qualitatives issues des entretiens, ces analyses illustrent l'intérêt d'une approche intégrée qui croise méthodes quantitatives et qualitatives. Elle permet non seulement de mieux comprendre les dynamiques locales d'adaptation et d'identifier des leviers d'action concrets, mais aussi de prendre en compte la valeur que revêt la gestion agricole dans la structuration et la préservation des paysages. Cette complémentarité d'échelles et de sources d'information enrichit l'interprétation des résultats et garantit des recommandations mieux adaptées à la diversité des contextes locaux.

La modélisation de la répartition potentielle des *codes cultures* les plus importants (blé, prairie permanente, pâturages extensifs et d'alpage) projette des impacts différenciés selon les scénarii climatiques futurs (RCP 4.5 et RCP 8.5) avec une influence plus importante du scénario RCP 8.5. Les surfaces présentant des conditions climatiques favorables pour les cultures comme le blé sont particulièrement importantes car une gradation altitudinale est visible et des territoires plus en altitude pourraient avoir ces conditions. Pour les prairies permanentes et les pâturages, les modèles montrent un déplacement des zones optimales en altitude, dans les deux régions, suggérant une adaptation possible mais nécessitant des changements dans les pratiques agricoles. Les pâturages d'alpage, quant à eux, pourraient voir leurs conditions changer drastiquement, notamment en ce qui concerne la temporalité, avec une pousse herbagère plus rapide.

Enfin, les entretiens menés auprès des agriculteurs révèlent une prise de conscience croissante des enjeux climatiques et une volonté d'adaptation, mais aussi des freins institutionnels et économiques importants. Les exploitants évoquent l'augmentation de la fréquence des sécheresses et la réduction de la disponibilité en eau comme des menaces majeures, et identifient la nécessité de diversifier les cultures ou d'adapter les calendriers de pâturage comme des solutions d'adaptation. Certains soulignent que la mixité des systèmes agricoles, c'est-à-dire la combinaison de plusieurs types de cultures et d'élevage, constitue une stratégie particulièrement durable. Elle leur permet de diversifier les pratiques, d'accroître leur résilience face aux aléas climatiques et de mieux gérer les ressources naturelles. Cependant, ils insistent sur le fait que la rigidité des cadres réglementaires et le poids des subventions conditionnées limitent leur capacité à innover. Les témoignages confirment que la résilience future du secteur dépendra autant de l'évolution des politiques agricoles que de la capacité d'adaptation locale, en particulier par le développement des exploitations mixtes qui offrent une meilleure protection face aux risques climatiques.

5.1 LA DISTRIBUTION DES *CODES CULTURES* SUR LE TERRITOIRE

Pour commencer, l'un des aspects majeurs de cette recherche réside dans la stratification de la surface agricole utile (SAU) en différents *codes cultures*, lesquels structurent l'espace de manière significative. Les deux régions étudiées présentent des caractéristiques intrinsèquement distinctes, tant sur le plan climatique avec, par exemple, des précipitations plus abondantes en Gruyère (NCSS, 2021a; NCSS, 2021b), que sur le plan topographique.

En effet, l'hypsométrie varie fortement d'une région à l'autre. En Entremont, la base des versants, marquée par de fortes pentes héritées des auges glaciaires, est majoritairement boisée, avec une large part de forêts protectrices (87% des forêts du Valais sont protectrices) (Canton du Valais, s.d.). En altitude, les pentes s'adoucissent pour former des replats accessibles, souvent occupés par les alpages dans des vallons glaciaires secondaires aux formes planes (Maillard, 2009). La situation en Gruyère contraste fortement avec celle de l'Entremont. Celle-ci se distingue par un relief hérité d'une longue histoire glaciaire et post-glaciaire, qui permet une utilisation du sol largement tournée vers l'agriculture (Etat de Fribourg, 2022; Grandgirard, 1999).

Ainsi, l'une des principales différences entre les deux régions concerne la pente des pâturages d'estive, les alpages d'Entremont présentant des inclinaisons nettement moins prononcées que ceux de Gruyère. Les pentes y sont également plus hétérogènes et le paysage moins stratifié qu'en Entremont. Par conséquent, la répartition des parcelles agricoles en Gruyère est moins strictement déterminée par la topographie et l'altitude que dans sa voisine valaisanne. L'influence différenciée de la topographie entre les deux régions a d'ailleurs été confirmée par les analyses multivariées (ACP et NMDS), lesquelles mettent en évidence des différences marquées dans la spécialisation des types de cultures, avec notamment une distinction moins nette entre prairies et pâturages en Gruyère qu'en Entremont.

Les tendances mises en évidence par les analyses statistiques (ACP et NMDS) révèlent l'existence de trois grands *clusters* de *codes cultures* : les monocultures (blé, seigle, maïs), les prairies et les pâturages, qu'ils soient d'estivage ou non. La stratification des *codes cultures* en Suisse avait déjà été soulignée par Pazúr et al. (2022) à l'échelle des terres arables et des prairies, sur la base de données satellitaires. Toutefois, cette étude ne distingue pas les différentes surfaces herbagères, alors que leur mode d'exploitation différencié, notamment la pâture ou la fauche, revêt une importance particulière dans les régions de montagne.

La présente recherche va plus loin en analysant non seulement les différences entre cultures céréalières et surfaces herbagères, mais également les variations au sein même de ces catégories. De manière générale, les résultats indiquent que la répartition spatiale des cultures suit une tendance altitudinale et topographique marquée : les monocultures se concentrent dans les zones planes de basse altitude, où les conditions se prêtent à la mécanisation. Les prairies occupent des surfaces légèrement plus élevées mais restant globalement planes, notamment pour les prairies permanentes (code 613), avec une stratification altitudinale entre types de prairies. Les prairies les plus intensives se trouvent dans les zones planes et proches des exploitations. Enfin, les pâturages se situent majoritairement sur des pentes marquées, où la mécanisation est difficile ou peu rentable.

La distribution différenciée des *codes cultures* dans les deux zones d'étude semble résulter de plusieurs facteurs, notamment des conditions climatiques et de la topographie. Cette recherche met ainsi en lumière la spécificité propre à chaque région et souligne l'importance d'une analyse fine et contextualisée. Une approche globalisante, comme le montrent l'ACP et les valeurs de KMO obtenues lorsque les deux régions sont fusionnées, tend à masquer certaines particularités régionales. Dès lors, une analyse détaillée à l'échelle locale apparaît plus pertinente pour appréhender avec précision l'organisation et le fonctionnement des régions étudiées. Cette précision d'analyse, bien que centrée sur deux cas d'étude spécifiques, offre des enseignements transférables à d'autres régions de montagne, sous réserve d'adapter les paramètres aux contextes locaux.

5.2 IMPORTANCE DU CROISEMENT DES ANALYSES

Ainsi, la stratification des différents *codes cultures* apparaît étroitement liée aux contextes topo-climatiques. Si une analyse fine des paramètres topographiques et climatiques permet déjà de comprendre l'organisation spatiale des cultures, l'intégration d'une lecture approfondie des dynamiques socio-économiques et politiques du territoire offre un niveau d'interprétation supplémentaire. Comme le soulignent Pazúr et al. (2022), les contraintes socio-politiques jouent également un rôle déterminant. La répartition actuelle des *codes cultures* dépend en effet non seulement des pratiques agricoles, mais aussi de facteurs externes tels que la législation et les conditions économiques. Ces dimensions ne peuvent toutefois être pleinement appréhendées qu'au moyen d'analyses quantitatives complémentaires. Ceci corrobore les travaux de Zimmermann et Kienast (1999) ainsi que de Randin et al. (2009a), qui montrent que la prise en compte des usages du territoire, des facteurs d'occupation des sols améliore la compréhension globale et la robustesse des analyses statistiques. La présente recherche confirme également que l'implication directe des agriculteurs est essentielle pour appréhender finement les réalités territoriales et les enjeux qui s'y rattachent. En ce sens, seule une approche intégrée, combinant analyses statistiques, données climatiques et retours d'acteurs de terrain, permet de saisir la complexité et les spécificités régionales des systèmes agricoles.

Par exemple, les subventions publiques suisses représentent 48% du revenu brut des agriculteurs (OCDE, 2024). Ceci souligne l'importance de suivre attentivement l'évolution des politiques agricoles, y compris des dispositifs tels que les réseaux écologiques. Ces orientations peuvent parfois être mal comprises par les agriculteurs, mais elles influencent fortement leurs choix. Dans les régions de montagne, où les aides publiques sont proportionnellement plus importantes qu'en plaine (cf. chapitre 2.1.2) (OFAG, s.d.), le respect des exigences légales conditionnant l'octroi de ces paiements constitue un enjeu crucial car en cas de non-conformité, la perte des aides aurait des conséquences financières particulièrement graves. Ceci contraint alors les exploitants à suivre les politiques agricoles, parfois au détriment des capacités agronomiques réelles de leurs parcelles.

Cette forte dépendance aux aides publiques et aux cadres réglementaires se traduit notamment dans la gestion des réseaux écologiques, un point relevé dans cette étude. Les

résultats montrent que les pâturages extensifs disposent d'une surface favorable nettement plus importante en Gruyère qu'en Entremont. Une simple analyse statistique ne permettrait toutefois pas d'en expliquer pleinement les raisons, qui tiennent en partie au cadre législatif. La législation agricole joue un rôle déterminant dans l'organisation du territoire, notamment en matière de surfaces de compensation écologique (art.14 OPD³⁹). Les exploitations sont tenues de consacrer 3,5% de leurs surfaces de cultures spéciales et 7% de leur surface agricole utile (SAU) à des mesures de compensation écologique. En Gruyère, certaines exploitations disposent de terrains dont la topographie serait plus adaptée à d'autres *codes cultures*, mais les contraintes législatives les contraignent à utiliser ces surfaces pour des *codes cultures* spécifiques, notamment des parcelles extensives, parfois au détriment d'une valorisation optimale en ce qui s'agit des productions. Elles sont alors contraintes de soustraire une partie de leurs terres productives, ce qui suscite incompréhension et mécontentement. Ainsi, plutôt que de s'ajuster aux spécificités naturelles des sols, les contraintes réglementaires influencent fortement la répartition des parcelles et les modes de gestion. La configuration spatiale qui en résulte ne peut donc être pleinement comprise sans croiser l'analyse de terrain avec la lecture du contexte réglementaire.

Au-delà des contraintes réglementaires et économiques, un autre facteur d'influence humaine marquant sur la répartition des cultures agricoles émerge clairement dans cette étude : l'irrigation. Cette recherche met ainsi en évidence l'importance de l'influence de l'irrigation sur les prairies permanentes (code 613) en Entremont. Les analyses statistiques (ACP, NMDS) révèlent une modification des optimums climatiques liée à l'irrigation. En augmentant la disponibilité en eau, l'irrigation permet à certaines prairies de prospérer dans des conditions plus chaudes et plus sèches, élargissant ainsi leur niche écologique vers des milieux habituellement moins favorables. Cette tendance est corroborée par les travaux de Smith et al. (2010), qui montrent qu'en régions à faibles précipitations, même une irrigation limitée peut accroître significativement les rendements fourragers.

Certaines parcelles, considérées comme peu rentables en raison d'un faible rendement herbager naturel, peuvent ainsi être maintenues grâce à l'apport en eau de l'irrigation. Cette dynamique crée une nette divergence dans les préférences environnementales. Les prairies non irriguées restent cantonnées aux zones plus humides, tandis que celles bénéficiant de l'irrigation peuvent s'étendre et subsister dans des secteurs plus secs. Ce phénomène est particulièrement visible dans la comparaison entre les deux régions étudiées, où les prairies permanentes d'Entremont évoluent dans des conditions climatiques très différentes de celles de Gruyère. De telles différences ne pourraient être mises en lumière par une analyse se limitant aux seules données statistiques. Certaines parcelles pouvant ainsi être considérées comme peu rentables, notamment à cause du faible rendement herbager peuvent ainsi être maintenues par l'apport d'eau venant de l'irrigation.

Outre les facteurs légaux et économiques, la rentabilité et la faisabilité opérationnelle constituent également des éléments déterminants dans le choix d'un *code culture* plutôt

³⁹ Ordonnance sur les paiements directs (OPD) du 23 octobre 2013 (RS 910.13)

qu'un autre. Ce constat a été réitéré à plusieurs reprises lors des entretiens, où le critère de faisabilité s'est souvent révélé plus prépondérant que celui des conditions climatiques. Par exemple, la pente du terrain apparaît fréquemment comme un obstacle majeur, même lorsque le climat local est favorable à certains *codes cultures*.

De plus, l'intégration des données qualitatives dans cette étude invite à garder à l'esprit certains « biais méthodologiques », notamment le fait que l'utilisation actuelle du territoire ne dépend pas uniquement des facteurs topo-climatiques. En effet, même si certaines parcelles pourraient théoriquement accueillir des *codes cultures* différents, ce sont les choix d'exploitation qui déterminent leur affectation réelle. Ces décisions modifient les statistiques de répartition des codes cultures, influençant ainsi les analyses quantitatives. La complémentarité de cette recherche, notamment grâce aux entretiens avec les agriculteurs et à l'échelle étendue de l'étude, permet de prendre en compte ces dimensions complexes.

De plus, il est crucial de différencier la cartographie des projections climatiques de la réalité concrète du terrain, ce que seul un croisement des approches quantitatives et qualitatives permet d'appréhender pleinement. En effet, la potentielle modification des codes cultures se heurte à plusieurs contraintes technico-légales identifiées lors des entretiens, telles que l'accessibilité des parcelles, l'utilisation de machines agricoles sur des pentes fortes ou encore la rentabilité économique des exploitations.

5.3 EVOLUTION DES CONDITIONS FAVORABLES DES *CODES CULTURES*

L'évolution des surfaces favorables aux différents *codes cultures* varie considérablement selon le type de culture, les scénarii climatiques et les caractéristiques régionales. Le scénario RCP 8.5 engendre des impacts bien plus marqués que le scénario RCP 4.5 sur ces surfaces, conformément aux tendances soulignées par les experts du GIEC ([Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021](#)). Toutefois, l'importance de l'impact du changement climatique diffère non seulement entre les deux régions d'étude, mais aussi en fonction de l'altitude, de l'exposition et de l'orientation des parcelles. Ainsi, les basses altitudes, les pentes fortement exposées au rayonnement solaire ou orientées au sud subissent des effets particulièrement significatifs. Ce résultat confirmant les recherches de Sérès ([2010a](#)).

Certains *codes cultures*, tels que les monocultures (céréales comme le blé, le seigle, le maïs) ou encore les pâturages extensifs (code 617), voient leurs surfaces favorables s'étendre dans le cadre des scénarii climatiques envisagés. À l'inverse, les prairies permanentes (code 613) ou les pâturages d'estivage (code 930), voient leurs surfaces favorables se réduire drastiquement, et ce de manière croissante selon les horizons temporels envisagés. Cette rétractation soulève non seulement des interrogations sur la viabilité à long terme de ces codes cultures, mais aussi sur la nécessité de développer des stratégies d'adaptation afin de maintenir les conditions actuelles. Certaines zones en altitude présentent désormais des conditions climatiques plus favorables aux prairies permanentes (code 613). Les conditions spécifiques des pâturages d'estive (code 930) augmentent eux aussi en altitude.

Plutôt qu'une simple « disparition », ce phénomène traduit une gradation altitudinale des *codes cultures*, ces derniers se déplaçant vers des zones plus élevées où les conditions sont

plus fraîches et humides. Cette gradation, ainsi que la possible apparition de nouveaux espaces ou de mosaïques paysagères mêlant différentes *codes cultures*, trouve un écho dans les travaux de Tobias et al. (2023), qui mettent en avant la transition progressive entre alpages et pâturages boisés. Le déplacement altitudinal des *codes cultures* est clairement mis en lumière tant par les cartes que par les analyses statistiques issues de la présente étude.

En s'appuyant sur les résultats de cette recherche, notamment la modélisation des conditions favorables pour les différents *codes cultures*, une modification de leur répartition est potentiellement à prévoir. Cette évolution peut se traduire par une substitution d'un *code culture* à un autre au sein de la surface agricole utile (SAU), ou par une extension des cultures dans des zones actuellement non agricoles.

5.3.1 Extension de la surface au sein de la SAU : changement de *code culture*

Pour commencer, les nouvelles conditions peuvent se manifester au sein de surfaces actuellement consacrées à d'autres *codes cultures*. Cependant, un changement de *code culture* implique avant tout une modification des pratiques agricoles, comme par exemple, passer de la pâture à la fauche, ce qui n'est pas toujours réalisable ou rentable, en particulier selon la configuration du terrain. Ce point a d'ailleurs été largement souligné lors des entretiens, notamment en ce qui concerne la pente et la charge de travail. Un changement de *code culture* peut donc sembler théoriquement envisageable, mais s'avérer en pratique difficile, voire impraticable.

Par exemple, les conditions futures potentiellement favorables aux prairies permanentes (code 613) se déplacent vers des altitudes plus élevées où les caractéristiques topographiques, notamment la pente, sont nettement différentes. Ici, la topographie apparaît comme un facteur déterminant, parfois plus contraignant que la température elle-même. Malgré des conditions climatiques a priori favorables, la charge de travail accrue, l'accessibilité difficile, ainsi que l'absence d'infrastructures adaptées constituent des obstacles majeurs à la reconversion de ces nouvelles surfaces en prairies permanentes (code 613). Par ailleurs, la question de l'accessibilité (chemin carrossable ou non) et des déplacements (proximité des exploitations, temps et coût des transports) revêt une importance particulière dans les régions de montagne, où la mobilité est souvent limitée, les trajets sont longs et complexes, influençant directement la viabilité économique des exploitations et la rentabilité de tels changements, comme souligné par cette étude.

5.3.1.1 *La place des cultures céréalières en montagne*

Certains *codes cultures*, notamment les cultures céréalières, voient leurs zones favorables s'étendre vers des altitudes plus élevées, l'augmentation des températures induite par le changement climatique jouant un rôle favorable dans ce phénomène. Cette tendance est particulièrement visible dans les modélisations des cultures telles que le blé (code 513) ou le maïs (521), dont les conditions climatiques favorables gagnent en altitude, notamment dans des zones aujourd'hui occupées par des prairies permanentes (code 613).

Toutefois, une telle évolution bouleverserait profondément les usages et les traditions actuels en montagne, où ces espaces sont traditionnellement dédiés à la production herbagère et bovine ([Association pour le développement de la culture fourragère \(ACDF\), 2007](#)). Malgré la faisabilité climatique suggérée par les modélisations, les entretiens avec les agriculteurs ont révélé des tensions socio-économiques sous-jacentes, notamment en termes de charge de travail et de rentabilité pour les exploitations.

Les exemples du terrassement historique à Prassurny (fig. 27), ou encore des cultures de fraises à Orsières (fig. 28), illustrent bien les efforts colossaux nécessaires pour maintenir une agriculture en pente, efforts qui sont aujourd'hui rarement soutenus à la hauteur des enjeux. Les charges de production y sont extrêmement élevées, en particulier face à un marché étranger moins onéreux et plus compétitif ([OFAG, 2024c](#)). Par exemple, selon le rapport agricole 2024, le prix de la pomme de terre allemande représente seulement 59% du prix suisse, tandis que celui des oignons s'établit à 78% du prix suisse. Dans les régions de montagne, où la charge de travail est plus importante que dans les plaines, ces faibles revenus découragent le maintien ou la reprise de telles pratiques agricoles ([OFAG, 2024c](#)). Ainsi, dans les régions de montagne où la charge de travail est plus importante que dans les régions de plaine, les faibles revenus associés à la culture découragent le maintien ou la reprise de ces pratiques.

Le retour des céréales en montagne pourrait renforcer la résilience face au changement climatique tout en diversifiant les pratiques agricoles. Les résultats des entretiens soulignent d'ailleurs que la pluralité des espèces végétales contribue à améliorer cette résilience. Par ailleurs, le choix de variétés adaptées à des températures plus élevées permettrait d'optimiser les performances de l'agriculture de montagne. L'étude de Parent et al. ([2018](#)) illustre ce point, en démontrant une augmentation de la production de maïs de +4% à +7% malgré les effets du changement climatique lors d'un choix réfléchi de la variété. Actuellement, des recherches menées en Suisse visent à réintégrer céréales et légumineuses dans les prairies de montagne, notamment l'orge perlée, l'orge brassicole et la féverole ([Agroscope, 2024](#)). Ce projet revêt une double importance : non seulement pour identifier des écotypes résistants à la sécheresse, mais aussi pour diversifier les revenus agricoles via des productions à haute valeur ajoutée, telles que le pain de seigle ou la bière à base d'orge.

Ainsi, le retour des cultures céréalières en montagne pourrait constituer un atout majeur pour les exploitants, à condition que les politiques agricoles et les dispositifs d'aide favorisent et encouragent la production alimentaire locale.



Figure 27: Photographie de mon arrière-arrière-grand-mère Valérie et ses cultures céréalières sur les terrassements de Prassurny (Entremont, commune d'Orsières). (Source: Carte Postale, date inconnue)



Figure 28: Photographie de ma grand-mère travaillant dans les champs de fraises à Orsières (Entremont) (Source: photo familiale, date inconnue).

5.3.2 Extension de la surface hors de la SAU

Ainsi, les zones nouvellement identifiées comme climatiquement exploitables pour certains *codes cultures* se situent soit dans des territoires déjà exploités mais sous un autre mode de gestion, soit dans des surfaces qui sont actuellement hors de la SAU. Par exemple, les conditions peuvent se retrouver dans des régions de forêts ou encore dans des zones jusqu'ici improductives, telles les marges glaciaires, les glaciers et les rochers. Les différents *codes cultures* voient leurs conditions climatiques favorables augmenter en altitude et atteindre des régions de haute altitude. Cette gradation altitudinale rejoint les observations faites au niveau des espèces végétales, avec des études comme celles de Walther et al. (2005) et Parolo et Rossi (2006) qui montrent une colonisation progressive des espèces vers des altitudes plus élevées, ainsi que les travaux de Tobias et al. (2023) qui soulignent la montée en altitude des essences forestières. Les codes cultures semblent suivre cette même dynamique.

Cependant, la valorisation de ces nouvelles zones dépend fortement des autorisations administratives et de la compatibilité avec les autres usages du territoire. En Suisse, la modification de la législation est un processus particulièrement complexe, soulevant trois problématiques principales.

Pour commencer, le principe du zonage tel que défini par la Loi sur l'aménagement du territoire (LAT⁴⁰) offre peu de possibilités pour des usages conjoints du sol, comme l'agroforesterie, rendant les transitions d'un usage à un autre particulièrement complexes. Ensuite, la protection des surfaces forestières, régie par la Loi sur les forêts (LFo⁴¹), est très stricte : elle ne prévoit pas de réduction de ces surfaces et tend plutôt à réduire la surface agricole. Par ailleurs, une grande partie des forêts est constituée de forêts de protection, jouant un rôle essentiel dans la gestion des risques naturels. Enfin, la protection des zones naturelles, encadrée par la Loi sur la protection de la nature et du paysage (LPN⁴²), complique l'exploitation des espaces récemment libérés, par exemple, par le recul des glaciers.

Cependant, certaines « exceptions » émergent, comme le projet pilote de pâture forestière en Argovie (RTS, 2025), qui illustre l'intérêt grandissant pour la création d'espaces multifonctionnels. Ces espaces combinent production alimentaire, maintien des paysages ouverts et conservation de la biodiversité. La multifonctionnalité des habitats semble être une étape intermédiaire plus accessible, que ce soit à travers la pâture forestière ou l'éventuelle mise en place de pâturages boisés en périphérie des pâturages classiques. Ces écosystèmes en mosaïque permettent d'assurer simultanément la production agricole, la préservation de la biodiversité et la lutte contre l'érosion (Buttler et al., 2012).

Toutefois, l'exploitation de nouveaux espaces implique inévitablement un arbitrage entre la charge de travail et la rentabilité, ainsi que des coûts supplémentaires liés aux infrastructures, à l'équipement et à l'accès. Selon les agriculteurs interrogés, la priorité demeure donc

⁴⁰ Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT) du 22 juin 1979 (RS 700)

⁴¹ Loi fédérale sur les forêts (LFo) du 4 octobre 1991 (RS 921.0)

⁴² Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN) du 01 juillet 1967 (RS 451)

l'entretien et l'optimisation des parcelles déjà exploitées. Toute évolution doit ainsi s'inscrire dans un équilibre constant entre coûts et bénéfices.

5.4 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES PRATIQUES AGRICOLES ET ADAPTATIONS

L'adaptation au changement climatique varie considérablement d'une exploitation à l'autre, selon les spécificités climatiques, les structures agricoles et les régions concernées. Les entretiens menés dans le cadre de cette recherche ont révélé que les agriculteurs les plus directement affectés par les changements climatiques sont également ceux qui se préoccupent le plus de cette problématique, tandis que ceux moins impactés manifestent une attention moindre. Cette variation dans la perception de l'adaptation corrobore les résultats de Sérès (2010b) dans les Alpes françaises.

Par ailleurs, trois enjeux majeurs découlant du changement climatique se dégagent clairement de cette étude : l'ambivalence de la croissance des herbages, la nécessité accrue d'irrigation, ainsi que le rôle central de la multifonctionnalité des exploitations agricoles (fig 29).

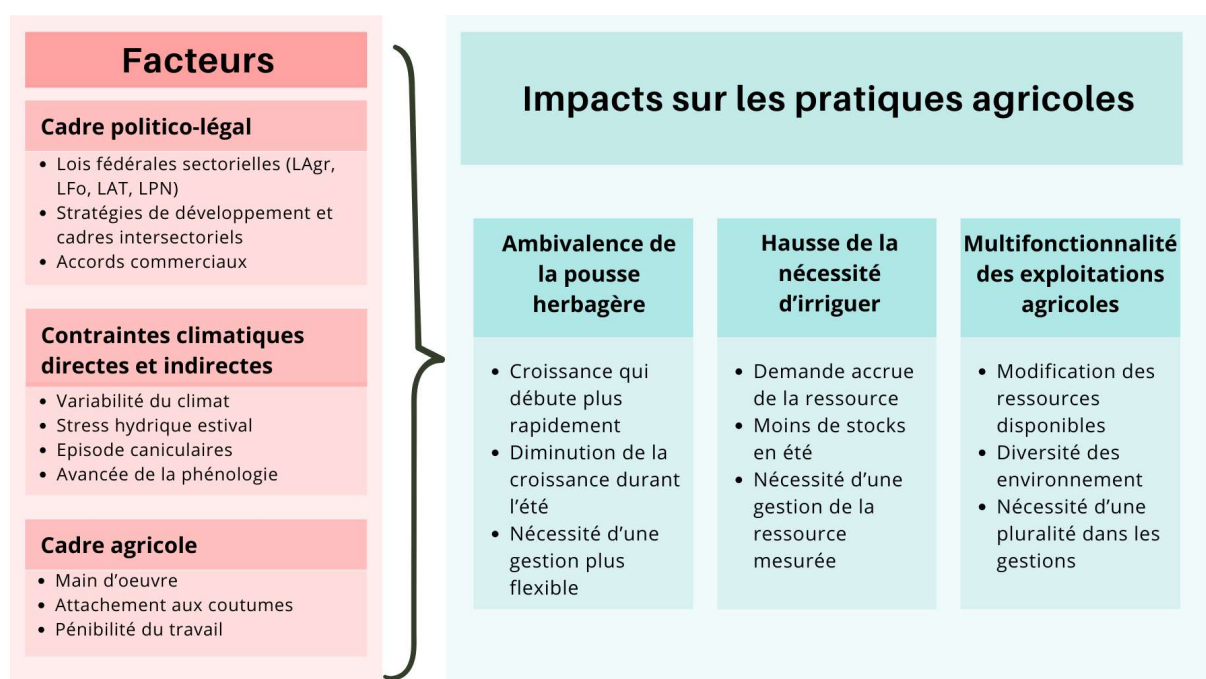


Figure 29 : Facteurs influençant les choix agricoles et impacts principaux du changement climatique sur les pratiques agricoles.

5.4.1 Ambivalence de la pousse herbagère

Le premier point récurrent dans les entretiens concerne la difficulté de gestion liée à l'ambivalence des effets du changement climatique. En effet, les agriculteurs rapportent un développement végétatif précoce, un phénomène confirmant les travaux de Vuffray et al. (2016), ainsi qu'un stress hydrique marqué durant la période estivale, qui affecte les rendements herbagers dans les zones les plus sèches. Ce constat rejoint les observations de Meisser et al. (2013), Calanca et al. (2016) ainsi que Mosimann et al. (2017).

Ainsi, dans un premier temps, le changement climatique influence notablement l'allongement de la période de végétation, principalement en raison des facteurs thermiques (CH2018, 2018). Pourtant, il impacte aussi la croissance végétale par des interruptions liées aux

précipitations irrégulières (Calanca et al., 2016; Mosimann et al., 2017). Cette ambivalence, fréquemment soulignée par les agriculteurs interviewés, complique la gestion fourragère, en particulier en ce qui concerne la pousse des herbages et la rentabilité associée à la pousse.

Les prairies permanentes apparaissent comme un véritable pivot dans l'évolution agricole visant à renforcer la résilience face au changement climatique. Leur importance ne réside pas uniquement dans leur rôle central au sein de l'économie des exploitations, mais aussi dans leur fonction de « réservoir » fourrager (Farrié et al., 2012). Les différents pâturages jouent également un rôle clef en permettant de réduire la charge sur les réserves de fourrage car lorsque les animaux pâturent directement, cela diminue la quantité de fourrage stocké nécessaire pour la période hivernale.

La question se pose alors : comment gérer au mieux les difficultés générées par cette ambivalence ? Comment maintenir des conditions optimales pour le bétail sans compromettre les ressources hivernales fournies par les prairies permanentes ? Ce dilemme, souligné à plusieurs reprises par les agriculteurs interviewés, illustre la complexité et la difficulté de concilier ces aspects dans la pratique. Par ailleurs, l'achat de fourrage pour compenser un déficit n'est généralement pas économiquement viable. Au-delà de la charge économique supplémentaire, des contraintes légales viennent également encadrer cette gestion, notamment pour la production des fromages AOP. Pour continuer à porter le label et garantir la typicité des produits, la législation impose une limite au fourrage importé hors de la zone de production : pas plus de 25% pour le Raclette du Valais AOP⁴³, et 30% pour le Vacherin Fribourgeois AOP⁴⁴ ainsi que pour le Gruyère AOP⁴⁵.

Cette ambivalence soulève ainsi des questions importantes concernant la gestion des parcelles et la temporalité des pâturages, notamment en ce qui concerne les tournées entre les différentes parcelles agricoles, ce qui requiert une grande flexibilité. Or, dans les régions de montagne, cette flexibilité est difficile à atteindre, principalement en raison du temps et de l'énergie nécessaires aux déplacements fréquents. Par conséquent, la résilience des exploitations de montagne s'en trouve réduite.

La gestion temporelle devient alors un enjeu crucial, rendant indispensable la rotation maîtrisée entre les pâturages de l'exploitation. Cela soulève également des interrogations sur d'autres formes d'adaptation, telles que la taille des cheptels ou le choix des espèces animales. Les questions suivantes se posent : y a-t-il suffisamment d'herbe en été pour nourrir l'ensemble du cheptel ? Faut-il réduire le nombre d'unités de gros bétail (UGB) ou privilégier des espèces plus rustiques, moins exigeantes en ressources fourragères et en eau ? Ces interrogations restent ouvertes et nécessiteraient des études approfondies, spécifiques à chaque exploitation, prenant également en compte les dimensions économiques et sociales.

⁴³ Cahier des charges du Raclette du Valais AOP du 3 novembre 2003.

⁴⁴ Cahier des charges du Vacherin Fribourgeois AOP du 22 décembre 2005.

⁴⁵ Cahier des charges du Gruyère AOP du 06 juillet 2001.

5.4.2 Nécessité accrue d'irrigation

Selon les analyses cartographiques et statistiques, les prairies permanentes apparaissent parmi les catégories les moins résilientes. Cependant, elles restent essentielles en raison de leur rôle complémentaire : toute variation dans leur quantité de fourrage a des répercussions directes sur les besoins en surfaces de pâturage. Cette étude met en évidence une vérité fondamentale : il est essentiel de préserver au maximum ce *code culture* avant d'envisager d'éventuels changements. La période estivale, cruciale pour la croissance des végétaux, constitue également une phase à risque en raison du manque d'eau, particulièrement dans les régions sèches ou sur sols peu profonds. Dans ce contexte, la nécessité d'irrigation devient primordiale pour maintenir les niveaux de production fourragers (Smith et al., 2010).

La gestion de l'eau diffère sensiblement entre les deux régions, tant par la quantité de précipitations reçues (NCSS, 2021a; NCSS, 2021b) que par la nature et le coût de la ressource. Par conséquent, la région d'Entremont, en raison de sa localisation en vallée interne, subit un risque accru de stress hydrique durant les mois estivaux, déterminants pour la croissance des espèces végétales. Le changement climatique amplifie cette pression en réduisant la disponibilité naturelle en eau et en accentuant les périodes sèches. Dans ce contexte, l'irrigation devient un levier essentiel pour maintenir la productivité des prairies permanentes, en compensant artificiellement les déficits hydriques et en soutenant la pousse herbagère (OFEV, 2008).

Toutefois, cette dépendance accrue à l'irrigation interroge sur la capacité des systèmes agricoles à s'adapter durablement aux nouvelles conditions climatiques, tout en préservant la résilience environnementale et la gestion raisonnée des ressources en eau. La question des stocks d'eau a émergé dans les discussions, notamment pour compenser la diminution future de l'eau issue de la fonte glaciaire. Bien que cette dernière puisse temporairement accroître la ressource disponible dans les prochaines années (Saalismaa & Simonett, 2023), les projections à long terme annoncent des étés plus chauds et plus secs, ce qui compromettrait la subsistance de ces stocks.

Baser l'évaluation de la résilience agricole uniquement sur l'usage de l'irrigation, comme c'est souvent le cas, serait réducteur, car cette pratique pourrait être optimisée pour améliorer durablement la gestion des ressources en eau. Les temps d'irrigation sont trop longs, l'érosion qui en découle est importante et la gestion de la ressource reste perfectible, nécessitant potentiellement de plus grands stocks d'eau. La question centrale devient alors : comment améliorer la rentabilité de cette pratique sans accroître encore le temps déjà conséquent consacré à l'irrigation ? En plus de la gestion de l'eau, l'irrigation soulève également des enjeux liés au temps de travail : lors des années sèches, celui-ci augmente considérablement, réduisant d'autant le temps disponible pour d'autres travaux véritablement agricoles.

Dans un contexte où les sécheresses risquent de s'intensifier et la demande en eau de croître, une utilisation mesurée et parcimonieuse de la ressource, couplée à une mécanisation accrue, s'impose. Dans cette optique, le projet ODILE met en avant une double solution pour l'irrigation en Entremont : l'automatisation et l'optimisation. Cela implique, d'une part, la possibilité d'irriguer à distance et, d'autre part, l'utilisation d'un outil d'aide à la décision

indiquant le moment et la quantité optimale d'eau à apporter. Les résultats obtenus sont significatifs, avec jusqu'à 50% d'économie d'eau ou 30% de production fourragère supplémentaire (Blueark, 2022). L'automatisation pourrait aussi être un gain de temps et de ressources, notamment en prenant en compte que le temps d'irrigation optimal se situe entre 45 et 180 minutes en fonction des parcelles et du nombre de fauches (Blueark, 2022), un laps de temps difficile à respecter sans solution adaptée, faute de disponibilité pour la manutention. Il serait donc pertinent d'envisager une analyse approfondie de la faisabilité d'un déploiement à plus grande échelle, par exemple au niveau du district.

5.4.3 La modification des environnements

Les différents environnements agricoles évoluent, notamment au niveau de la phénologie des plantes et de la sécheresse des sols. Face à ces changements, certaines techniques de résilience consistent à exploiter la diversité des environnements, à créer cette multiplicité ou encore à adapter les exploitations aux conditions locales.

5.4.3.1 Utiliser les environnements différents

La pluralité des environnements, ou l'utilisation différenciée du territoire, apparaît comme une clef d'adaptation majeure dans cette étude. Cela peut passer par des pratiques telles que l'agroforesterie ou la combinaison de cultures et d'élevage.

Ainsi, les agriculteurs biologiques rencontrés soulignent que le fait de combiner une exploitation animale et des cultures constitue un élément essentiel pour diversifier et sécuriser leurs revenus. La variété d'espèces cultivées leur permet également de compenser les pertes liées à des conditions climatiques extrêmes, chaque culture réagissant différemment aux aléas météorologiques. Ainsi, capitaliser sur les atouts propres à chaque région permettrait de développer des productions ciblées, renforçant la résilience des agriculteurs, y compris en zone de montagne, et réduisant leur dépendance exclusive à l'herbe.

Par ailleurs, l'association des cultures céréalières et des forêts fait l'objet d'un regain d'intérêt en Suisse, notamment avec le programme Agro4estrie de Prométerre, qui vise autant la formation en agroforesterie que sa mise en place (Prométerre, s.d.). Ces démarches montrent qu'une utilisation intelligente de la nature, sans pression excessive, constitue une piste d'adaptation prometteuse face aux impacts du changement climatique.

5.4.3.2 S'adapter aux nouveaux environnements

L'évolution des environnements est une réalité inévitable. Si un environnement atteint ses performances maximales mais que les mesures mises en place perdent en efficacité, la question de la pratique agricole se pose, en particulier le choix du cheptel, de ses espèces et de ses effectifs. Dans cette optique, la mixité animale apparaît comme un atout majeur, non seulement pour optimiser l'utilisation différenciée des ressources naturelles, mais aussi pour renforcer l'équilibre entre les systèmes agricoles et leurs environnements. Cette approche valorise une complémentarité étroite entre agriculture et milieu naturel, dépassant la simple

domination ou adaptation unilatérale de l'agriculture sur l'environnement, en considérant au contraire la coexistence et la synergie entre les deux.

Comme soulevé dans les interviews, les animaux diffèrent par leurs capacités physiques, leurs préférences alimentaires et leurs besoins en ressources. Par exemple, les bovins préfèrent généralement les herbes hautes et denses, tandis que les moutons sélectionnent plus finement et consomment une plus grande diversité de plantes, y compris des espèces moins appétentes pour les bovins. Cet état de fait a d'ailleurs été démontré dans l'étude de Rutter (2010). Ces choix alimentaires influencent directement la composition floristique des prairies, comme confirmé par les interviews.

Dans cette étude, il a été observé que certaines pratiques comportent des risques : une forte présence de moutons ou de chèvres sur des terrains en pente accentue l'érosion, non seulement par la sélection de certaines espèces végétales, mais aussi par le piétinement, ce qui corrobore les travaux de Bayne, Harden et Davies (2003).

5.5 LIMITES

Malgré les apports significatifs de cette étude, certaines limites méthodologiques et contextuelles doivent être soulignées afin de mieux situer la portée des résultats. Ces contraintes concernent notamment la nature des données utilisées, la représentativité des terrains d'étude, ainsi que les aspects liés à l'échelle spatiale et temporelle des analyses. Identifier ces limites permet non seulement de nuancer les conclusions, mais aussi de définir des pistes d'amélioration et d'approfondissement pour les recherches futures.

Pour commencer, les différents *codes cultures* offrent des conditions climatiques différenciés avec certains beaucoup plus résilients que d'autres. Cependant, les conditions climatiques favorables identifiées par les modèles sont basées sur l'utilisation actuelle du sol agricole. Autrement dit, les préférences climatiques sont modélisées à partir des zones actuellement utilisées pour chaque type de culture. Cela peut introduire un biais important, car certaines conditions potentiellement favorables dans d'autres zones ne sont pas prises en compte, simplement car elles ne sont pas exploitées aujourd'hui (e.g. forêts, zones protégées, différents types de cultures actuellement non présents sur le territoire).

De plus, certains types de *codes cultures*, notamment les cultures céréalières, présentent un nombre d'occurrences insuffisant pour permettre une modélisation fine. Si elles offrent une trajectoire générale, leurs résultats manquent de précision. Ce biais pourrait toutefois être atténué par une analyse avec des données plus nombreuses ou à échelle européenne par exemple, permettant d'affiner l'analyse. Un autre facteur de biais concerne les parcelles irriguées, qui peuvent fausser certains optima climatiques, en particulier dans des régions comme l'Entremont. Une distinction explicite entre parcelles irriguées et non irriguées améliorerait la compréhension de la répartition spatiale et des usages agricoles.

A contrario, les projections climatiques, notamment pour les alpages, peuvent présenter un phénomène d'*overfitting*. La moyenne des variables abiotiques sur des surfaces topographiquement hétérogènes (ex. : grands alpages) conduit à un lissage excessif, masquant les micro-variabilités locales. Cela peut générer des zones futures de prédisposition

surestimées, y compris dans des zones extrêmes comme les sommets du massif du Mont Blanc, où les projections s'étendent de manière peu réaliste vers des espaces verticaux peu exploitables.

Ainsi, cette analyse reflète davantage une adéquation climat-topographie-usage actuelle qu'un potentiel intrinsèque indépendant uniquement des conditions topo-climatiques, mais il permet cependant de mettre en lumière quelques principes de gestion actuels. De plus, Le modèle a été calibré à une échelle fine, ce qui limite sa transférabilité à d'autres territoires. Cependant, la direction du changement projeté reste cohérente, conférant à l'outil une valeur interprétative pour la compréhension des dynamiques territoriales et le dialogue entre acteurs. Il s'agit donc d'un outil de médiation plus que d'un outil prédictif absolu.

5.6 RECOMMANDATIONS

5.6.1 Analyse ciblée des régions dont les surfaces favorables restent stables

Il serait intéressant de mener une analyse approfondie des zones agricoles qui, selon les projections climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5), ne voient pas leurs conditions environnementales significativement modifiées à l'horizon 2050. Ces « régions stables » pourraient constituer des pôles de résilience agricole. Il serait pertinent d'y réévaluer le zonage territorial et d'envisager un remaniement de la disposition des *codes cultures*, afin que la localisation des surfaces agricoles suive plus étroitement les nouvelles niches climatiques favorables. Cette démarche permettrait d'optimiser l'utilisation des ressources et d'anticiper les besoins d'adaptation structurelle, tout en identifiant le potentiel adaptatif de ces territoires pour l'ensemble de la région. Cependant, pour affiner davantage l'analyse de ces surfaces, il serait pertinent de mener une étude ciblée intégrant d'autres facteurs environnementaux, tels que la pédologie et la pente, ainsi que des dimensions sociales comme les aspects économiques, afin d'améliorer la précision et la pertinence des résultats.

5.6.2 Analyse ciblée des stocks d'eau et de son utilisation mesurée

Un aspect central de cette recherche concerne l'utilisation de la ressource en eau. Il serait pertinent d'approfondir l'étude des volumes d'eau utilisés, ainsi que leurs finalités précises, afin de quantifier avec exactitude les besoins totaux des exploitations, notamment en matière d'irrigation. Cette démarche permettrait d'adapter efficacement la constitution de stocks d'eau régionaux, en tenant compte des variations locales.

Par ailleurs, le développement à plus grande échelle de systèmes d'irrigation automatisés et optimisés, comme développé dans le projet ODILE, apparaît comme une piste prometteuse. Ces technologies pourraient non seulement diminuer la consommation d'eau, mais également réduire la charge de travail liée à la manutention. Une gestion plus mesurée et intelligente de l'eau contribuerait ainsi à préserver la qualité des sols et à maintenir la résilience des espèces végétales, tout en assurant la durabilité des exploitations agricoles.

6. CONCLUSION

Cette recherche s'est attachée à démêler la complexité des interactions entre le changement climatique et l'agriculture de montagne en Suisse, à travers l'analyse fine de deux régions contrastées : l'Entremont et la Gruyère. En mobilisant une méthodologie transdisciplinaire (croisant analyses spatiales/statistiques, modélisations prospectives et entretiens approfondis avec des agriculteurs), ce travail a permis de saisir non seulement la diversité des impacts du changement climatique, mais aussi les tensions et paradoxes qui les traversent.

L'étude met en évidence que la distribution des pratiques agricoles, des pâturages extensifs aux monocultures, est profondément structurée par les gradients climatiques et topographiques, mais aussi par des cadres législatifs parfois rigides. Ces derniers, en cherchant à préserver la mono-fonctionnalité des espaces agricoles (production, biodiversité, paysage), peuvent paradoxalement freiner l'adaptation nécessaire face à l'accélération des mutations climatiques. On observe ainsi que les systèmes agricoles les plus spécialisés, notamment ceux reposant sur les prairies temporaires ou les monocultures, affichent une résilience moindre face aux aléas, alors même qu'ils sont centraux pour la souveraineté alimentaire nationale. Ce constat soulève la question de la révision de certaines politiques publiques et de l'urgence d'innover dans les pratiques (irrigation raisonnée, diversification, agroforesterie) pour maintenir la capacité productive sans accroître la dépendance aux importations.

L'analyse révèle que les agriculteurs perçoivent la nécessité d'adapter techniques, modèles de gestion et calendriers agricoles. L'allongement de la saison de végétation, la montée en altitude des conditions optimales pour certaines cultures, ou encore la pression accrue sur la ressource en eau imposent des ajustements parfois radicaux. Pourtant, la réalité du terrain rappelle que l'accessibilité, la rentabilité et la législation limitent fortement la possibilité de déplacer ou d'étendre les surfaces agricoles, en particulier dans les zones de montagne où la forêt et les zones protégées constituent des verrous puissants.

Sur le plan scientifique, la démarche adoptée, fondée sur une analyse à haute résolution spatiale et sur le croisement entre données quantitatives et retours d'expérience, a permis de révéler des différences marquées entre les régions, tout en soulignant la difficulté de transférer directement les résultats d'un contexte à l'autre. Cette limite, loin d'être un défaut, confère à l'étude une valeur de « laboratoire ». La méthodologie développée ici pourrait être adaptée à d'autres régions alpines (Grisons, Alpes autrichiennes, Écrins...), permettant de mieux comprendre les piliers de la résilience agricole en montagne à travers des analyses ciblées et localisées.

En définitive, l'agriculture de montagne apparaît comme un terrain d'observation privilégié pour les enjeux d'adaptation au changement climatique : elle cristallise les tensions entre tradition et innovation, production et conservation, local et global. Les réalités contrastées des districts de l'Entremont et de la Gruyère, où s'entremêlent contraintes topographiques, climatique, enjeux économiques, pratiques agricoles héritées et nouvelles technologies, illustrent à la fois les difficultés et les opportunités d'une agriculture résiliente. Ce cas ouvre ainsi une réflexion essentielle sur la manière de concilier souveraineté alimentaire,

préservation du patrimoine culturel et adaptation climatique dans les territoires d'altitude suisses, mais aussi, par extension, dans l'ensemble de l'arc alpin.

RÉFÉRENCES

- Ackerly, D. (2003). Community Assembly, Niche Conservatism, and Adaptive Evolution in Changing Environments. *International Journal of Plant Sciences*, 164(3), 165-184.
- Agroscope. (2024, juin 21). *Faire revivre les grandes cultures en zone de montagne*. Récupéré sur https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/actualite/newsroom/2024/06-21_ackerbau-berggebieten-wiederbeleben.html
- Agroscope. (s.d.). *Risques climatiques pour l'agriculture et possibilités d'adaptation*. Consulté le août 05, 2025, sur <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/environnement-ressources/climat-hygiene-lair/changements-climatiques-et-agriculture.html>
- Alexandre, F., & Birre, D. (2022). Entre déprise agropastorale et changement climatique, les limites mouvantes des étages de végétation en montagne : l'exemple pyrénéen. Dans M. Janner-Raimondi, & D. Pernot, *Oser l'interdisciplinarité. Rencontres croisées autour du vivant (coll. Éclaboussements, p. 9)*. Téraèdre.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232.
- Anderson, R. P., Peterson, A. T., & Gómez-Laverde, M. (2002). Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. *Oikos*, 98(1), 3-16. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.t01-1-980116.x>
- Araújo, M. B., & New, M. G. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(1), 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W., & Erhard, M. (2005). Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11, 1504-1513.
- ARE. (s.d.). *Disparition des surfaces agricoles*. Consulté le avril 12, 2025, sur <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/developpement-et-amenagement-du-territoire/bases-et-donnees/observation-du-territoire/natur-landschaft/disparition-des-surfaces-agricoles.html>
- Association pour le développement de la culture fourragère (ACDF). (2007). *Lignes de force pour la production fourragère en Suisse*. Nyon: ACDF.
- Austin, M. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157(2-3), pp. 101-118. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00205-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00205-3)
- Austin, M., Nicholls, A., & Margules, C. R. (1990). Measurement of the Realized Qualitative Niche: Environmental Niches of Five Eucalyptus Species. *Ecological Monographs*, 60(2), 161-177.
- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert, C. H., & Thuiller, W. (2012). Selecting pseudo-absences

- for species distribution models: how, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), 327-338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Bartlett, M. (1950). Tests of Significance in Factor Analysis. *British Journal of Statistical Psychology*, 3(2), 77-85. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1950.tb00285.x>
- Baumann, W., & Moser, P. (2012, août 16). *Politique agricole*. Consulté le 06 11, 2025, sur Dictionnaire historique de la Suisse: <https://hls-dhs-dss.ch/fr/articles/013789/2012-08-16/>
- Bayne, P., Harden, R., & Davies, I. (2003). Feral goats (*Capra hircus* L.) in the Macleay River gorge system, north-eastern New South Wales, Australia. I. Impacts on soil erosion. *Wildlife Research*, 31(5), 519-525. <https://doi.org/10.1071/WR03039>
- Björnsen Gurung, A., & Stähli, M. (2014). *Ressources en eau de la Suisse : ressources disponibles et utilisation, aujourd'hui et demain*. Berne: Fond national suisse de la recherche scientifique.
- Blueark. (2022). *Projet ODILE : Optimisation de l'irrigation des prairies en Entremont : Preuve du concept POC Factsheet*. Récupéré sur <https://wp.unil.ch/bluemount/projets/odile/resultats-odile/>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-31.
- Breiner, F. T., Anand, M., Butchart, S., Flörke, M., Fluet-Chouinard, E., Guisan, A., . . . Nagy, S. (2021). Setting priorities for climate change adaptation of critical sites in the Africa-Eurasian waterbird flyways. *Global Change Biology*, 28, 739-752.
- Broennimann, O., & Guisan, A. (2024). CHclim25—a spatially and temporally very high-resolution climatic dataset for Switzerland. *Earth System Science Data Discussions*, 1-13. <https://doi.org/10.5194/essd-2024-79>.
- Buttler, A., Gavazov, K., Peringer, A., Seihoff, S., Mariotte, P., Wettstein, J.-B., . . . Spiegelberger, T. (2012). Conservation des pâturages boisés du Jura: défis climatiques et agro-politiques. *Recherche Agronomique Suisse*, 1-8.
- Calanca, P., Déléglise, C., Martin, R., Carrère, R., & Mosimann, E. (2016). Testing the ability of a simple grassland model to simulate the seasonal effects of drought on herbage growth. *Field Crops Research*, 187, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.008>
- Calanca, P., Fuhrer, K., Jasper, K., Keller, F., & Dueri, S. (2005). Klimawandel und landwirtschaftliche Produktion. *AGRARForschung*, 12(9), 392-397.
- Canton du Valais. (s.d.). *Forêts de protection*. Consulté le juillet 10, 2025, sur <https://www.vs.ch/web/sfnp/gestion-des-forets-de-protection>
- Centlivres, P. (2002). Le portrait introuvable : la Suisse des expositions nationales. *Ethnologie française*, 31(2), 311-320.
- CH2018. (2018). *Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich: National Centre for Climate Services.
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure.

- Australian Journal of Ecology*, 18(1), 117-143.
- Cola, G., Failla, O., Maghradze, D., Megreldze, L., & Mariani, L. (2017). Grapevine phenology and climate change in Georgia. *International Journal of Biometeorology*, 61, 761-773. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1241-9>
- Confédération suisse. (1988, avril 29). *Loi fédérale sur l'agriculture (LAgr) RS910.1*.
- Confédération Suisse. (1999). *Constitution fédérale de la Confédération suisse (RS 101)*.
- Confédération Suisse. (2022). *Environnement Suisse 2022 : Rapport du Conseil fédéral*. Berne: Le Conseil Fédéral.
- Confédération suisse. (2024). *Revenus des familles paysannes : rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 21.4585 Bulliard*. Berne: Le Conseil Fédéral. Récupéré sur <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/86422.pdf>
- Conseil Fédéral. (2015). *Stratégie d'adaptation de la Suisse aux changements climatiques*. Berne: Le Conseil Fédéral.
- Demierre, T., Franchina, N., Gebhard, G., & Hobi, T. (2018). *Alpages et changements climatiques : incidence de la sécheresse sur les alpages du Pays-d'Enhaut [travail universitaire]*. Université de Lausanne, Suisse: cours d'aménagement et protection des Alpes.
- Dictionnaire Historique de la Suisse. (2013). *Expositions universelles*. Consulté le août 06, 2025, sur <https://hls-dhs-dss.ch/fr/articles/013797/2013-10-10/>
- Dirnböck, T., Dullinger, S., & Grabherr, G. (2003). A regional impact assessment of climate change and land-use change on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*, 30, 401-417.
- Dirnböck, T., Essl, F., & Rabitsch, W. (2011). Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change. *Global Change Biology*, 17, 990-996. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02266.x>
- Drake, J. M., Randin, C., & Guisan, A. (2006). Modelling ecological niches with support vector machines. *Journal of Applied Ecology*, 43, 424-432. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01141.x>
- Dubuis, A., Giovanettina, S., Pellissier, L., Pottier, J., Vittoz, P., & Guisan, A. (2012). Improving the prediction of plant species distribution and community composition by adding edaphic to topo-climatic variables. *Journal of Vegetation Science*, 24, 593-606. <https://doi.org/10.1111/jvs.12002>
- Elith, J., & Graham, C. H. (2009). Do they? How do they? Why do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography*, 32, 66-77.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., . . . Zimermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>

- Engler, R., & Guisan, A. (2009). MigClim: Predicting plant distribution and dispersal in a changing climate. *Diversity and Distributions*, 15, 590-601. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2009.00566.x>
- Engler, R., Randin, C., Thuiller, W., Dullinger, S., Zimmermann, N. E., Araújo, M. B., . . . Guisan, A. (2011). 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology*, 17(7), 2330-2341. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02393.x>
- Eriksen, C., & Hauri, A. (2021). *Politique de sécurité : analyses du (CSS) ETH Zurich*.
- Etat de Fribourg. (2022). *Collines d'érosion glaciaire: Gruyères- Pringy - Bérauta. Inventaire des géotopes d'importance cantonale – Étude de base – Fiche d'objet*. Inventaire des géotopes d'importance cantonale - Etude de base - Fiche d'objet.
- FAO. (2019). *Mountain Agriculture : Opportunity for harnessing Zero Hunger in Asia*. FAO.
- Farrié, J. P., Launay, F., & Devun, J. (2012). Place et utilisation des prairies permanentes dans les élevages en France. *Journées AEPF*, 29-38.
- Fischer, A., Strassmann, K., Croci-Maspoli, M., Hama, A., Knutti, R., Kotlarski, S., . . . Zubler, E. (2022). Climate Scenarios for Switzerland CH2018 – Approach and Implications. *Climate Service*, 26(100288). <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100288>
- Forster, S. L., Kharouba, H. M., & Smith, T. W. (2022). Testing the assumption of environmental equilibrium in an invasive plant species over a 130 year history. *Ecography*, 45(7), 1001-1012. <https://doi.org/10.1111/ecog.06284>
- Grandgirard, V. (1999). *Inventaire des géotopes géomorphologiques du canton de Fribourg [Mémoire, Université de Fribourg]*. Université de Fribourg. Institut de Géographie.
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- Guisan, A., Theurillat, J.-P., & Kienast, F. (1998). Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment. *Journal of Vegetation Science*, 9(1), 65-74. <https://doi.org/10.2307/3237224>
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). *Habitat Suitability and Distribution Models : with Applications in R*. Cambridge University Press.
- Hampe, A. (2004). Bioclimate envelope models: What they detect and what they hide. *Global Ecology and Biogeography*, 13(5), 469-471. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2004.00090.x>
- Hastie, T., & Tibshirani, R. (1986). Generalized Additive Models. *Statistical Science*, 1(3), 297-318.
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components.

- Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417-441.
- Hutchinson, G. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.*, 22, 415-427.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Kaiser, H. F. (1970). A second generation little jiffy. *Psychometrika*, 35(4), 401-415. <https://doi.org/10.1007/BF02291817>
- Kearney, M. (2006). Habitat, environment and niche: what are we modelling? *Oikos*, 115(1), 186-191. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14908.x>
- Köllner, P., Gross, C., Schäppi, B., Füssler, J., Lerch, J., & Nausser, M. (2017). *Risques et opportunités liés au climat. Une synthèse à l'échelle de la Suisse*. Berne: Office fédéral de l'environnement (OFEV).
- Kreft, H., & Jetz, W. (2010). A framework for delineating biogeographical regions based on species distributions. *Journal of Biogeography*, 37(11), 2029-2053. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02375.x>
- Kriticos, D., & Leriche, A. (2010). The effects of climate data precision on fitting and projecting species niche models. *Ecography*, 33(1), 115-127. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06042.x>
- Kruskal, J. B. (1964). Multidimensional Scaling by Optimizing Goodness of Fit to a Nonmetric Hypothesis. *Psychometrika*, 29(1), 1-27. <https://doi.org/10.1007/BF02289565>
- Lauber, S., Herzog, F., Seidl, I., Böni, R., Bürgi, M., Gmür, P., . . . Wunderli, R. (2014). *Avenir de l'économie alpestre suisse. Faits, analyses et pistes de réflexion du programme de recherche AlpFUTUR*. Birmensdorf, Institut fédéral de recherche WSL ; Zurich-Reckenholz, Station de recherche Agroscope.
- Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Developments in Environmental Modeling* (éd. 3). Amsterdam: Elsevier.
- Lehmann, A., Allenbach, K., Maggini, R., Richard, J.-P., Jaquet, J.-M., & Dao, H. (2010). *Swiss Environmental Domains. A new spatial framework for reporting on the environment*. Berne, Suisse: Office fédéral de l'Environnement.
- Maillard, B. (2009). *Inventaire des géomorphosites des vallées d'Entremont et de Ferret [travail de master]*. Université de Lausanne.
- Mann, S., Stoinescu, A., Nüssli, S.-M., & Spycher, L. (2019). Les alpages communautaires entre biens communaux et incitations. *Recherche agronomique suisse*, 10(6), 244-249.
- Mantel, N. (1967). The detection of disease clustering and a generalized regression approach. *Cancer Research*, 27(2), 209-220.
- McCullagh, P., & Nelder, J. A. (1989). *Generalized Linear Models* (éd. 2nd). London, England: Chapman and Hall.

- Meisser, M., Délégise, C., Mosimann, E., Signarbieux, C., Mills, R., Schlegel, P., . . . Jeangros, B. (2013). Production végétale : effets d'une sécheresse estivale sévère sur une prairie permanente de montagne du Jura. *Recherches agronomiques suisse*, 4(11-12), 476-483.
- Mellert, K. H., Fensterer, V., Küchenhoff, H., Reger, B., Kölling, C., Klemmt, H. J., & Ewald, J. (2011). Hypothesis-driven species distribution models for tree species in the Bavarian Alps. *Journal of Vegetation Science*, 22, 635-646.
- MétéoSuisse. (2014). *Scénarios climatiques Suisse - un aperçu régional : rapport technique n° 243*. Berne, Suisse: Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse.
- MétéoSuisse. (s.d.). Récupéré sur Climat CH2025: <https://www.meteosuisse.admin.ch/portrait/recherche-et-collaboration/projets/2023/climat-ch2025.html>
- MétéoSuisse. (s.d.(a)). *Normes climatologiques Château d'Oex*. Consulté le 08 06, 2025, sur <https://www.meteosuisse.admin.ch/services-et-publications/applications/ext/climate-climsheet.html>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Mosimann, E., Bossuyt, N., & Frund, D. (2017). Préparation de la production fourragère au changement climatique. *Agroscope Science*, 49, 1-36.
- Mosimann, E., Meisser, M., Delégise, C., & Jeangros, B. (2012). Potentiel fourrager des pâturages du Jura. *Recherches Agronomiques Suisses*, 3(11-12), 516-523.
- Muscatello, A., Elith, J., & Kujala, H. (2020). How decisions about fitting species distribution models affect conservation outcomes. *Conservation Biology*, 35(4), 1309-1320.
- Naujokaitis-Lewis, I. R., Curtis, J.-M. R., Tischendorf, L., Badzinski, D., Lindsay, K., & Fortin, M. (2013). Uncertainties in coupled species distribution–metapopulation dynamics models for risk assessments under climate change. *Diversity and Distributions*, 19, 541-554.
- NCSS. (2018). *What are emission scenarios?* Consulté le avril 05, 2025, sur <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/climate-change-and-impacts/climate-basics/what-are-emission-scenarios-.html>
- NCSS. (2021a). *Alpes, Le climat actuel*. Consulté le 03 24, 2025, sur <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/grandes-regions/alpes/le-climat-actuel.html>
- NCSS. (2021b). *Préalpes, Le climat actuel*. Consulté le 03 24, 2025, sur <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/grandes-regions/prealpes/le-climat-actuel.html>
- NCSS. (2024, 06 26). Récupéré sur Comprendre les scénarios climatiques: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisse/comprendre-les-scenarios-climatiques.html>

- Nelder, J. A., & Wedderburn, R. W. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 135(3), 370-384. <https://doi.org/10.2307/2344614>
- OCDE. (2024). *Politiques agricoles : suivi et évaluation 2024. L'innovation au service de la croissance durable de la productivité*. Paris, France: Editions OCDE.
- OFAG. (2019). *Rapport Agricole 2019*. Office fédéral de l'agriculture. Consulté le avril 18, 2025
- OFAG. (2024a). *Rapport agricole 2024*. Office fédéral de l'agriculture. Consulté le avril 18, 2025, sur <https://www.agrarbericht.ch/fr/services/documentation/publications>
- OFAG. (2024b). *Catalogue culture principale*. Consulté le 10 11, 2024, sur <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/politik/datenmanagement/geografisches-informationssystem-gis/landwirtschaftliche-kulturflaechen.html>
- OFAG. (2024c). *Rapport agricole 2025*. Office fédéral de l'agriculture. Consulté le avril 18, 2025, sur <https://www.agrarbericht.ch/fr/services/documentation/publications>
- OFAG. (s.d.). *Zones agricoles*. Consulté le avril 18, 2025, sur <https://www.blw.admin.ch/fr/zones-agricoles>
- OFAG, Unité de direction Paiements Directs et développement rural. (2023). *Aide à l'exécution Feuille d'information n° 6.2*.
- OFEV. (2008). *Prairies et pâturages secs : Irrigation*. Berne, Suisse: OFEV documentation.
- OFEV. (2017). *Impulsions pour une adaptation de la Suisse aux changements climatiques. Conclusions de 31 projets pilotes sur l'adaptation aux changements climatiques*. Berne, Suisse: Office fédéral de l'environnement.
- OFEV. (2022). *Les régions biogéographiques de la Suisse : Etat 2022*. Consulté le octobre 11, 2024, sur <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/paysage/publications-etudes/publications/les-regions-biogeographiques-de-la-suisse.html>
- OFEV. (2023). *Impulsions pour une adaptation de la Suisse aux changements climatiques. Conclusions de 50 projets pilotes sur l'adaptation aux changements climatiques*. Berne, Suisse: Office fédéral de l'Environnement.
- OFEV, MétéoSuisse & NCSS. (2020). *Changements climatiques en Suisse Indicateurs des causes, des effets et des mesures. Etat de l'environnement n° 2013.*, (p. 109p). Berne, Suisse.
- OFS. (2021a). *Part des surfaces improductives dans la superficie totale, en 2013/18 [Statistique suisse de la superficie (AREA)]*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/16268_8754_214_213/25453.html
- OFS. (2021b). *Part des surfaces boisées* (forêt et autres surfaces boisées) dans la superficie totale, en 2013/18. OFS [Statistique suisse de la superficie (AREA)]*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/16267_225_214_213/25445.html
- OFS. (2021c). *Part des surfaces agricoles dans la superficie totale, en 2013/18. OFS [Statistique*

- suisse de la superficie (AREA)]. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/16266_223_214_213/25559.html
- OFS. (2022a). *Etat et évolution de la population. [Statistique de la population et des ménages (STATPOP)]*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/17492_72_71_70/27089.html
- OFS. (2022b). *Etat et évolution de la population. Densité de la population selon la surface productive. [Statistique suisse de la superficie (AREA), Statistique de la population et des ménages (STATPOP)]*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/17498_3002_3501_70/27105.html
- OFS. (2022c). *Structure de l'économie, secteur primaire. [Statistique structurelle des entreprises (STATENT)]*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/18025_9077_9075_138/27821.html
- OFS. (2022d). *Structure de l'économie, secteur secondaire. Emplois, secteur économique 2*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/18026_9078_9075_138/27824.html
- OFS. (2022e). *Structure de l'économie, secteur tertiaire. Emplois, secteur économique 3*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/18027_9079_9075
- OFS. (2022f). *Exploitation et surfaces agricoles utiles. OFS [Relevé des structures agricoles (STRU)]*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/17965_5882_5872_4801/27738.html
- OFS. (2022g). *Unité de gros bétail, en 2022. [Relevé des structures agricoles (STRU)]*. Consulté le mars 24, 2025, sur https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/17972_5896_5872_4801/27745.html
- OPD. (2013, 10 23). Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture. RS910.13.
- Oskanen, J., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, B., Simpson, G. L., Solymos, P., . . . Wagner, H. (2008). *Vegan: Community Ecology Package*. R Documentation.
- Parent, B., Leclerc, M., Lacube, S., Semebov, M., Welcker, C., Martre, P., & Tardieu, F. (2018). Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Agricultural Sciences*, 115(42), 10642-10647. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>
- Parolo, G., & Rossi, G. (2006). Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in the Alps. *Basic and Applied Ecology*, 9(2), 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2007.01.005>
- Pauli, H., Gottfried, M., Reiter, K., Klettner, C., & Grabherr, G. (2007). Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global Change Biology*, 13, 147-156. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01282.x>
- Pazùr, R., Huber, N., Weber, D., Ginzler, C., & Price, B. (2022). A National Extent Map of

- Cropland and Grassland for Switzerland based on Sentinel-2 data. *Earth Syst. Science Data*, 14, 295-305. <https://doi.org/10.5194/essd-14-295-2022>
- Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559-572. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology & Biogeography*, 12, 361-371. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x>
- Pearson, R. G., Thuiller, W., Araújo, M. B., Martinez-Meyer, E., Brotons, L., McClean, C., . . . Lees, D. (2006). Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, 33, 1704-1711. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01460.x>
- Pepin, N. C., Arnone, E., Gobit, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., . . . Adler, C. (2022). Climate Changes and Their Elevational Patterns in the Mountains of the World. *Review of Geophysics*, 1-40. <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>
- Petsch, D. K., Ribas, L. G., Montovano, T., Pulzatto, M. M., Alves, A. T., Pinha, G. D., & Thomaz, S. M. (2021). Invasive potential of golden and zebra mussels in present and future climatic scenarios in the New World. *Hydrobiologia*, 848(10), 2319-2334. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04412-w>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Prométerre. (s.d.). *Projet Agro4esterie*. Consulté le juillet 11, 2025, sur <https://www.prometerre.ch/prestations/projets-et-acquisitions-de-references/agroforesterie>
- Randin, C. F., Jaccard, H., Vittoz, P., Yoccoz, N., & Guisan, A. (2009b). Land use improves spatial predictions of mountain plant abundance but not presence-absence. *Journal of Vegetation Science*, 20(6), 996-1008. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01098.x>
- Randin, C., Dirnböck, T., Dullinger, S., Zimmermann, N., Zappa, M., & Guisan, A. (2006). Are niche-based species distribution models transferable in space? *Journal of Biogeography*, 33(10), 1689-1703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01466.x>
- Randin, C., Engler, R., Normand, S., Zappa, M., Zimmermann, N., Pearman, P., . . . Guisan, A. (2009a). Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology*, 15(6), 1557-1569. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01766.x>
- Rebetez, M., & Reinhard, M. (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000. *Theor. Appl. Climatol.*, 91, 27-34. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0296-2>
- Reynard, E., & Schoeneich, P. (2021). *Landscapes and Landforms of Switzerland: Structural and Karstic Landscapes of the Joux Valley (Southwestern Jura)*. Springer International

- Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_7
- Reynard, E., Bonriposi, M., Graefe, O., Homewood, C., Huss, M., Kauslaric, M., . . . Weingartner, R. (2014). Interdisciplinary assessment of complex regional water systems and their future evolution: how socioeconomic drivers can matter more than climate. *WIREs Water*, 1, 413-426. <https://doi.org/10.1002/wat2.1032>
- Ridgeway, G. (1999). The state of boosting. *Computing Science and Statistics*, 31, 172-181.
- RTS. (2025, 07 09). *150 ans après son interdiction, la pâture forestière revient au nom de la biodiversité*. Récupéré sur <https://www.rts.ch/info/environnement/2025/article/le-paturage-en-foret-une-pratique-interdite-qui-renait-pour-la-biodiversite-28937083.html>
- Rudaz, G., & Debarbieux, B. (2013). *La montagne suisse en politique*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Rutter, M. (2010). *Review: Grazing preferences in sheep and cattle: Implications for production, the environment and animal welfare*. Newport: Harper Adams University College.
- Saalismaa, N., & Simonett, O. (2023). *Montagnes et changements climatiques : Synthèse des liens, N°10*. Réseau Climat, RRC et Environnement de la DDC.
- Schiller, F. (1804). *Wilhelm Tell*. Tübingen, Allemagne: J.G. Cotta'sche Buchhandlung.
- Seastedt, T., & Oldfather, M. (2021). Climate Change, Ecosystem Processes and Biological Diversity Responses in High Elevation Communities. *Climate*, 9(5), 1-16.
- Secrétariat d'État à l'économie SECO. (2022, 12 20). *Politique pour les espaces ruraux et les régions de montagne (PERM)*. Récupéré sur https://www.seco.admin.ch/seco/fr/home/Standortfoerderung/Regional_Raumordnungspolitik/kore/p-lrb.html
- Sérès, C. (2010a). L'agriculture face au changement climatique en zone de montagne : évolutions climatiques, perception des éleveurs et stratégies d'adaptation des systèmes fourragers. *Fourrages*, 204, 297-306.
- Sérès, C. (2010b). L'agriculture de montagne face au changement climatique : exposition des territoires et marges de manœuvre des exploitations laitières. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 59, 19-32.
- Smith, P. C., Calanca, P., & Fuhrer, J. (2010). Modelling irrigation demand from two grasslands in Switzerland under contrasting climatic conditions and soil properties. *5th International Congress on Environmental Modelling and Software*. Ottawa, Ontario, Canada. Récupéré sur <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2010/all/580>
- Steiner, J. (2020). *Village suisse et Village noir : Repräsentation zweier Völker an der Schweizerischen Landesausstellung in Genf 1896 [Travail universitaire, Université de Bâle]*. Universität Basel Philosophisch-Historische Fakultät Departement Künste, Medien, Philosophie Seminar für Medienwissenschaft.

- Teuling, A.-J., Van Loon, A.-F., Seneviratne, S., Lehner, I., Aubinet, M., Heinesch, B., . . . Spank, U. (2013). Evapotranspiration Amplifies European Summer Drought. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2071-2075. <https://doi.org/10.1002/grl.50495>.
- Thuiller, W., Lavorel, S., & Araújo, M. (2004). Do we need land-cover data to model species distribution in Europe? *Journal of Biogeography*, 31, 353-361.
- Tobias, S., Siegriest, E., Bütikofer, L., Bürgi, M., Liechti, K., Reynard, E., . . . Randin, C. (2023). *+4 °C et plus : les paysages suisses face au changement climatique*. Berne: WSL. <https://doi.org/10.55419/wsl:35310>
- Union Suisse des Paysans. (2024). *Agriculture en montagne*. Consulté le octobre 11, 2024, sur <https://www.sbv-usp.ch/fr/etiquettes/agriculture-de-montagne/>
- Union suisse des paysans. (2025). *Production végétale*. Consulté le décembre 06, 2025, sur <https://www.sbv-usp.ch/fr/etiquettes/grandes-cultures>
- Vetaas, O. (2002). Realized and potential climate niches: a comparison of four *Rhododendron* tree species. *Journal of Biogeography*, 29(4), 545-554. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00694.x>
- Vincente, J., Alves, P., Randin, C., Guisan, A., & Honrado, J. (2010). What drives invasibility? A multi-model inference test and spatial modelling of alien plant species richness patterns in northern Portugal. *Ecography*, 33(6), 1081-1092. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.6380.x>
- Vitasse, Y., Bottero, A., & Bigler, C. (2019). Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Global Change Biology*, 25(11), 3781-3792. <https://doi.org/10.1111/gcb.14803>
- Vittoz, P., Randin, C., Dutoit, A., Bonnet, F., & Hegg, O. (2009). Low impact of climate change on subalpine grassland in the Swiss Northern Alps. *Global Change Biology*, 15(1), 209-220. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01707.x>
- Vuffray, Z., Déléglise, C., Amaudruz, M., Jeangros, B., Mosimann, E., & Meisser, M. (2016). Développement phénologique des prairies de fauche - 21 ans d'observation. *Recherche agronomique suisse*, 7(7-8), 322-329.
- Walther, G., Breissner, S., & Burga, C. A. (2005). Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science*, 16(5), 541-548. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02394.x>
- Yee, T. W., & Mitchell, N. D. (1991). Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science*, 2(5), 587-602. <https://doi.org/10.2307/3236170>
- Ziehli, K. (2019, novembre 04). *Le mythe du bon paysan Suisse – Une chronique de l’instrumentalisation politique d’une figure idéalisée*. Consulté le mai 15, 2025, sur De Facto plus que des opinions: <https://www.defacto.expert/2025/03/10/le-mythe-du-bon-paysan-suisse-une-chronique-de-linstrumentalisation-politique-dune-figure-idealisee/?lang=fr>
- Zimmermann, N., & Kineast, F. (1999). Predictive Mapping of Alpine Grasslands in Switzerland:

Species versus Community Approach. *Journal of Vegetation Science*, 10(4), 469-482.
<https://doi.org/10.2307/3237182>

ANNEXES

- ANNEXE 1. Fiches des exploitations
- ANNEXE 2. Explication des différents modèles de SDM
- ANNEXE 3. Guide d'entretien
- ANNEXE 4. ACP par code culture pour DIM1 ET DIM3
- ANNEXE 5. Résultat de l'NMDS
- ANNEXE 6. Valeurs quantitatives de l'évolution des potentiels de gestion
- ANNEXE 7. Evolution des Niches climatiques des différents *codes cultures* selon les horizons et les scenarii
- ANNEXE 8. Illustration de la courbe réponse du blé en Entremont
- ANNEXE 9. Surfaces stables par type de gestion, horizon et scenarii climatique

ANNEXE 1 : FICHES DES EXPLOITATIONS

Exploitation 1



Exploitants

- 2 exploitants qui ont chacun un travail autre à 100%
- Aide bénévole et familiale



Surface exploitée : 14ha

- Parcelles : 830m à 1500m
 - Prairies permanentes : 6ha
 - Autres prairies : 1ha
 - Pâturages extensifs : 5ha
- Estivage en alpage : 1800m à 2500m
 - Une partie hors zone d'étude

Cheptel



Production



Exploitation 2



Exploitants

- 1 exploitant à 100%
- 1 employé à 100%
- 1 Saisonnier
- Aide bénévole et familiale



Surface exploitée : 40ha

- Parcelles : 850m à 1600m
 - Prairies permanentes : 25ha
 - Autres prairies : 5ha
 - Pâturages extensifs : 6ha
 - Autres pâturages : 4ha
- Estivage en alpage : 1600m à 2500m

Cheptel



Production



Exploitation 3



Exploitants

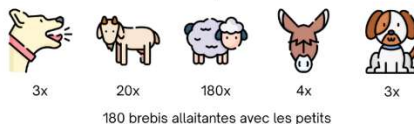
- 2 exploitants à 100%
- Aide bénévole et familiale



Surface exploitée : 48ha

- Parcelles : 750m à 1700m
 - Prairies permanentes : 23ha
 - Pâturages extensifs : 25ha
- Estivage à la montagne : 1900m à 2900m

Cheptel



Production



Exploitation 4



Exploitants

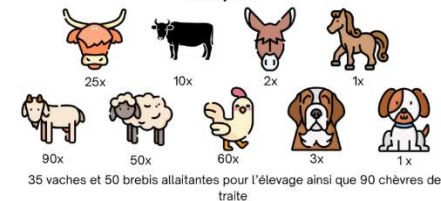
- 2 exploitants à 100% qui ont un travail hivernal
- Arrangements avec d'autres exploitants
- Aide bénévole et familiale



Surface exploitée : 40ha

- Parcelles : 1200m à 1600m
 - Prairies permanentes : 20ha
 - Pâturages extensifs : 20ha
 - dont 10ha en PPS
- Alpage : 1600m à 3080m

Cheptel



Production



Exploitation 5



Exploitants

- 1 exploitant à 100%
- 1 employé 9 mois par an
- Aide bénévole et familiale



Surface exploitée : 36ha

- Parcelles : 1050m à 1700m
 - Prairies permanentes : 26ha
 - Autres prairies : 7ha
 - Pâturages extensifs : 3ha
- Estivage en alpage : 1800m à 2500m
- Une partie hors zone d'étude

Cheptel



52x 8x

26 vaches laitières (Hérens et Holstein), 30 têtes de jeune bétail et 5 taureau d'engraissement

Production



Production de lait pour du fromage de laiterie raclette du Valais AOP

Exploitation 6



Exploitants

- 1 exploitants à 100%
- 1 ouvrier
- Aide bénévole et familiale



Surface exploitée : 37,5ha

- Parcelles : 750 à 950m
 - Prairies permanentes : 27ha
 - Autres prairies : 6ha
 - Pâturages extensifs : 0,5ha
 - Autres pâturages : 4ha
- Estivage en alpage : 1200m

Cheptel



100x

40 vaches laitières et 60 têtes de jeune bétail

Production



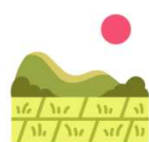
Production de lait

Exploitation 7



Exploitants

- 2 exploitant à 100% avec un travail complémentaire
- Entraide entre agriculteurs



Surface exploitée : 25ha

- Parcelles : 700m
 - Maïs : 1ha
 - Blé : 2ha
 - Prairies permanentes : 10ha
 - Prairies temporaires : 10ha
 - Pâturages extensifs : 2ha
- Estivage à 930m

Cheptel



70x

35 vaches laitières bio, 35 têtes de jeune bétail

Production



Vente de blé et production de lait bio

Exploitation 8



Exploitants

- 2 exploitants à 100%
- Mandate des personnes pour certains travaux



Surface exploitée : 55ha

- Parcelles : 700m à 950m
 - Terre ouverte : 20ha
 - Prairies temporaires : 15ha
 - Prairies intensives : 16,5ha
 - Pâturages extensifs : 3,5ha
- Estivage sur la SAU : 950m

Cheptel



2000x

13x

2000 poules pondeuses bio et 13 vaches allaitantes

Production



Production de maïs, blé, triticales, épeautre, colza et betterave sucrière variable selon les années. Vente de blé bio, d'œufs bio ainsi que de viande de vaches et volaille

Exploitation 9



- 2 exploitants
- Aide familiale

Exploitants

- Surface exploitée : 40ha**
- Parcelles : 750m à 900m
 - Maïs : 3,5ha
 - Blé : 2,5ha
 - Prairies temporaire: 3,5ha
 - Prairies permanente : 29ha
 - Autres pâturages : 1,5ha
 - Estivage en alpage : altitude?
 - Une partie hors zone d'étude

- Cheptel**
- 82x 28x 2x
- 28 vaches laitières, 82 vaches d'élevage (limousine) dont 40 allaitante et 42 têtes de jeune bétail

- Production**
- Lait de fromagerie pour le Gruyère AOP de plaine et viande

Exploitation 10



- Exploitation familiale mais 1 exploitant principal
 - 3 générations qui s'entraident
- 1 ouvrier
- 1 Aide sur demande

Exploitants

- Surface exploitée : 40ha**
- Parcelles : 900m
 - Maïs : 1ha
 - Prairies permanentes : 39ha
 - Estivage en alpage: 1150m à 1800m

Cheptel

- 210X 13x 6x
- 60 vaches laitières et 150 têtes de jeune bétail

Production

- Production de lait de fromagerie pour le Gruyère AOP et Vacherin Fribourgeois AOP durant l'hiver et fabrication de Gruyère d'alpage AOP et Vacherin Fribourgeois d'alpage AOP en été. Viande de cochon d'alpage.

ANNEXE 2 : EXPLICATIONS DES DIFFÉRENTS MODÈLES DE SDM

Les GLMs (*Generalized Linear Models* – Modèles Linéaires Généralisés) sont des extensions des modèles linéaires classiques qui permet de modéliser des variables réponses non gaussiennes, comme la présence/absence d'une espèce (erreur binomiale). Il utilise une fonction de lien (souvent le logit) pour relier la probabilité de présence aux variables explicatives (climat, topographie, etc.). Ces modèles sont simples, interprétables et bien adaptés aux données biologiques. La sélection *stepwise* des variables explicatives est appropriée dans le cas de cette recherche avec peu de variables candidates.

L'approche de moyennage de modèles (*Model averaging*) appliquée aux GLM consiste à construire plusieurs modèles linéaires généralisés candidats en utilisant différentes combinaisons de variables explicatives, puis à combiner leurs prédictions selon un critère de qualité de modèle, en l'occurrence dans cette étude l'AIC (Vincente et al., 2010). Chaque modèle est donc vu comme une approximation partielle de la réalité, et sa contribution à la prédiction finale dépend de sa performance relative.

Le GAM (*Generalized Additive Model* – Modèle Additif Généralisé) est une extension du GLM qui remplace les relations linéaires entre la variable réponse (observations d'espèces) et les variables explicatives par des fonctions non paramétriques (splines), permettant de capturer des relations non linéaires complexes. Il conserve une distribution d'erreur binomiale pour les données d'occurrence. Les GAM sont plus flexibles que le GLM pour modéliser des relations écologiques non linéaires mais moins interprétable, avec un risque de surajustement (overfitting ; (Randin et al., 2006)).

MaxEnt (*Maximum Entropy Modeling*) est une méthode semi-paramétrique conçue pour les données de présence uniquement, souvent utilisées avec des pseudo-absences. Elle estime la distribution de probabilité la plus uniforme (maximisant l'entropie), sous contrainte que la moyenne des variables explicatives corresponde à celle des localisations de présence. MaxEnt est très performant avec des données limitées, et robuste aux corrélations entre variables explicatives. Cependant cette technique est par exemple moins transparente que les GLM dans le fonctionnement et sensible au choix des pseudo-absences et au surajustement.

Le GBM (*Gradient Boosting Machine* – Arbre de Décision Boosté) est une méthode d'apprentissage supervisé fondée sur l'agrégation séquentielle de nombreux arbres de décision, chaque nouvel arbre corrigeant les erreurs du précédent. Il peut gérer une distribution binomiale de la variable réponse. Cette technique a une grande capacité de prédiction, capture des interactions complexes et les non-linéarités des variables explicatives (Elith et al., 2006). Les GBM nécessitent cependant un réglage précis des paramètres (profondeur des arbres, taux d'apprentissage) mais leur structure reste difficilement interprétable contrairement à un GLM ou à un GAM.

Le *Random Forest* (RF, Forêt Aléatoire) est un ensemble d'arbres de décision indépendants, construits à partir de sous-échantillons aléatoires de variables réponses et explicatives. La prédiction finale est obtenue par vote majoritaire (dans le cas d'une distribution binomiale de

variable réponse ; présence-absence). Cette technique est robuste, peu sensible au bruit et gère bien la non-linéarité et les interactions des variables explicatives. Cependant, les RF peuvent être biaisés dans le cas d'un déséquilibre fort entre présences et absences.

Le jeu de données d'observation ne contenant pas de véritables absences, des pseudo-absences ont été générées afin de permettre la calibration des modèles de distribution des codes cultures. Pour un code culture, les localisations d'observation des autres codes cultures ont été utilisées comme pseudo-absences. Cette approche s'appuie sur la méthodologie décrite notamment par ([Barbet-Massin et al., 2012](#)), qui recommande l'utilisation de pseudo-absences en absence de données de présence/absence complètes.

ANNEXE 3 : GUIDE D'ENTRETIEN

Introduction

- Présentation de la recherche (objectif, durée, anonymat, consentement)

Fiche informative de l'exploitation

- Nom de l'exploitation, commune, localisation
- Main d'œuvre
 - Exploitants principaux
 - Salariés permanents
 - Nombre de saisonniers et de bénévoles
- SAU
 - SAU totale et par type de code culture
 - Altitude de l'exploitation (moyenne, minimum, maximum)
 - Situation des parcelles (fond de vallée, coteau, plateau, autre)
 - Autonomie fourragère
- Cheptel
 - Nombre de vaches (laitières, allaitantes, têtes de jeune bétail)
 - Nombre de bovins, de caprins (laitiers, allaitants)
 - Autres animaux
- Production

Perception du changement climatique actuel

- Avez-vous constaté des changements dans les conditions climatiques sur votre exploitation ces 10-20 dernières années ?
 - Sécheresse, températures, précipitations, enneigement, phénologie ?
- Ces changements ont-ils déjà influencé vos pratiques agricoles ?
- Quels types d'aléas climatiques vous préoccupent le plus pour l'avenir ?

Lectures des cartes (même procédé pour les 3 types de cartes : prairies permanentes, pâturages extensifs et pâturages d'alpage)

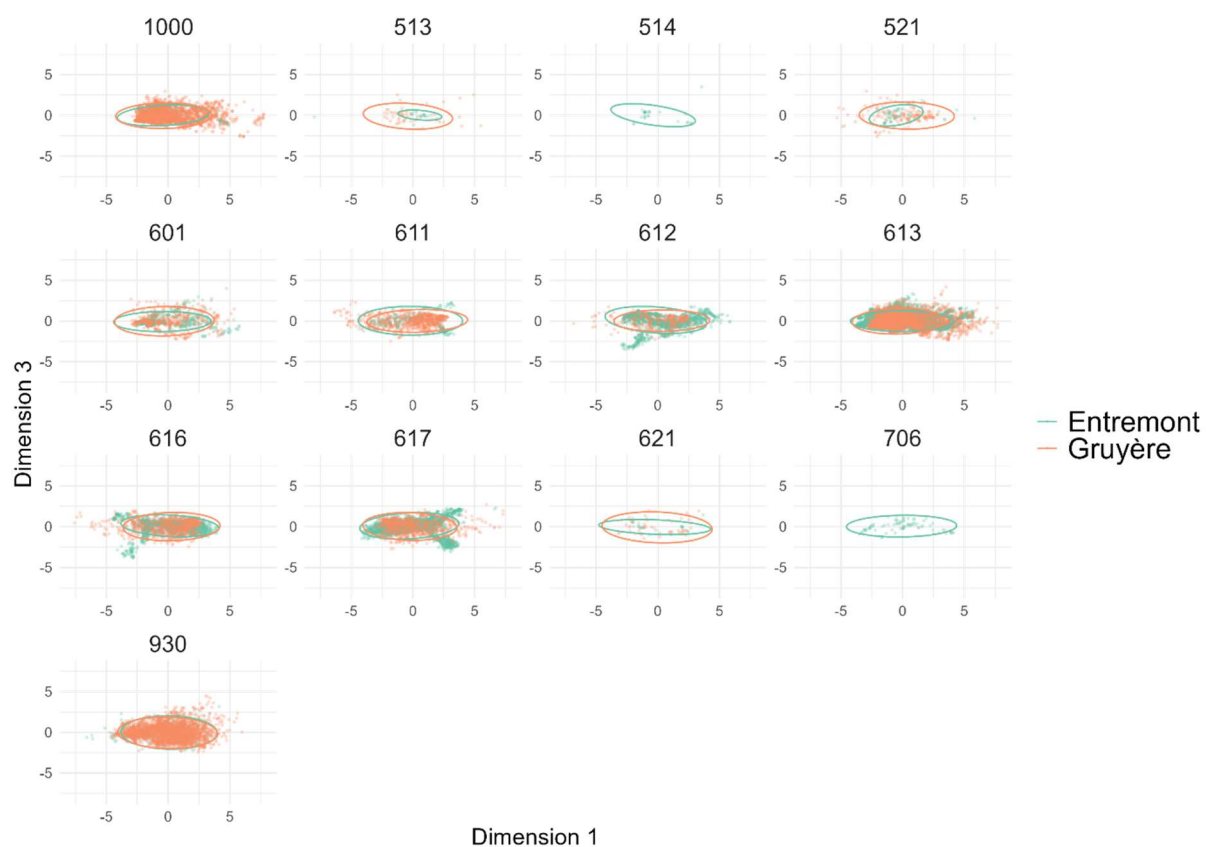
- Explication des cartes (avec et sans restriction aux parcelles agricoles actuelles).
- Que pensez-vous des projections à l'horizon 2060 qui apparaissent sur la carte ?
 - Est-ce que la carte correspond à ce que vous observez déjà sur le terrain ? Avez-vous constaté des changements similaires ?

- Selon vous, quelles seraient les conséquences pour votre exploitation si les surfaces favorables disparaissaient (ou se déplaçaient selon la carte) ?
 - Perte de fourrage, sécheresse
 - Changement de gestion : culture, temporalité, taille du cheptel, type de cheptel
 - Adaptation des terrains : irrigation, arbres, autre
- Est-ce que vous pourriez envisager d'exploiter les nouvelles surfaces indiquées comme favorables sur la carte (par exemple, en altitude) ? Quelles seraient les difficultés ou limites ?
 - Accès, maintien, travail, dangers, lois, ressources, main d'œuvre, rentabilité, autre
 - Possibilité d'étendre la zone ou non : lois, subventions.

Retour introspectif et projections futures

- Comment imaginez-vous l'agriculture dans la région d'ici 2050–2060 ?
- Si vous pouviez proposer une mesure ou un projet pour renforcer la résilience agricole locale, lequel serait-ce ?
- Si vous aviez une baguette magique, pour quoi l'utiliseriez-vous ?

ANNEXE 4 : ACP PAR CODE CULTURE POUR DIM1 ET DIM3



ANNEXE 5 : RÉSULTAT DE L'NMDS

L'ordination NMDS réalisée sur les différentes variables environnementales des parcelles agricoles en Entremont met en évidence une structuration nette des différents types d'usages du sol dans l'espace environnemental. Cette analyse présente un stress très faible (0,046), indiquant une excellente adéquation entre les distances originales et leur représentation dans l'espace réduit. Cette qualité est confirmée par un coefficient de Mantel élevé ($r = 0,996$, $p = 0,001$) et un R^2 de Shepard de 0,993, attestant que la configuration NMDS préserve fidèlement les dissimilarités environnementales entre parcelles.

6.1.1.1 Entremont

L'ordination NMDS réalisée sur les variables environnementales des parcelles agricoles d'Entremont révèle une structuration des groupes d'usage du sol très similaire à celle obtenue par l'ACP (fig. 30). Les deux méthodes mettent en évidence deux gradients principaux : un gradient thermique sur la première dimension, et un gradient topographique sur la seconde. Toutefois, la NMDS permet d'apprécier plus finement l'importance relative de ces axes, non pas par des pourcentages de variance expliquée, mais par la forme et l'étirement des ellipses de dispersion des groupes.

Les cultures de blé (code 513), de seigle (code 514) et de maïs (code 521) sont regroupées à l'extrémité gauche de la première dimension, caractérisées par des conditions homogènes, fraîches et peu pentues. Leurs ellipses sont particulièrement restreintes, en particulier pour le blé, indiquant des niches environnementales très spécifiques et plus étroites encore que dans l'ACP. À l'inverse, d'autres codes cultures (ex. : plantes aromatiques et médicinales (code 706)) occupent des niches plus larges, traduisant des exigences environnementales moins strictes.

Les prairies temporaires (code 601) montrent un recouvrement partiel avec les cultures, mais restent bien distinctes des autres types de prairies, reflétant une relative homogénéité environnementale. Les autres prairies et pâturages présentent des ellipses plus grandes et davantage de chevauchement, indiquant une plus forte hétérogénéité écologique et une structuration principalement marquée par les gradients de pente, d'humidité et de chaleur.

Les prairies et pâturages présentent un chevauchement marqué et des ellipses nettement plus grandes, reflétant une forte hétérogénéité écologique. Ce chevauchement est particulièrement visible pour les prairies extensives (code 611) et peu intensives (code 612), qui occupent des milieux plutôt plats et humides, tandis que les pâturages attenants à la ferme (code 616) et extensifs (code 617) forment un cluster distinct, caractérisé par des pentes plus importantes. Les prairies permanentes (code 613) se situent en position centrale, avec l'ellipse la plus vaste, traduisant une très grande diversité de conditions parmi ces parcelles.

Les pâturages d'estivage (code 930) se distinguent nettement à droite de la première dimension, dans des milieux pentus, humides et souvent en altitude. Leur ellipse est très étirée, mettant en évidence une grande amplitude écologique, encore plus marquée que dans l'ACP, ce qui traduit une forte plasticité environnementale de ces milieux.

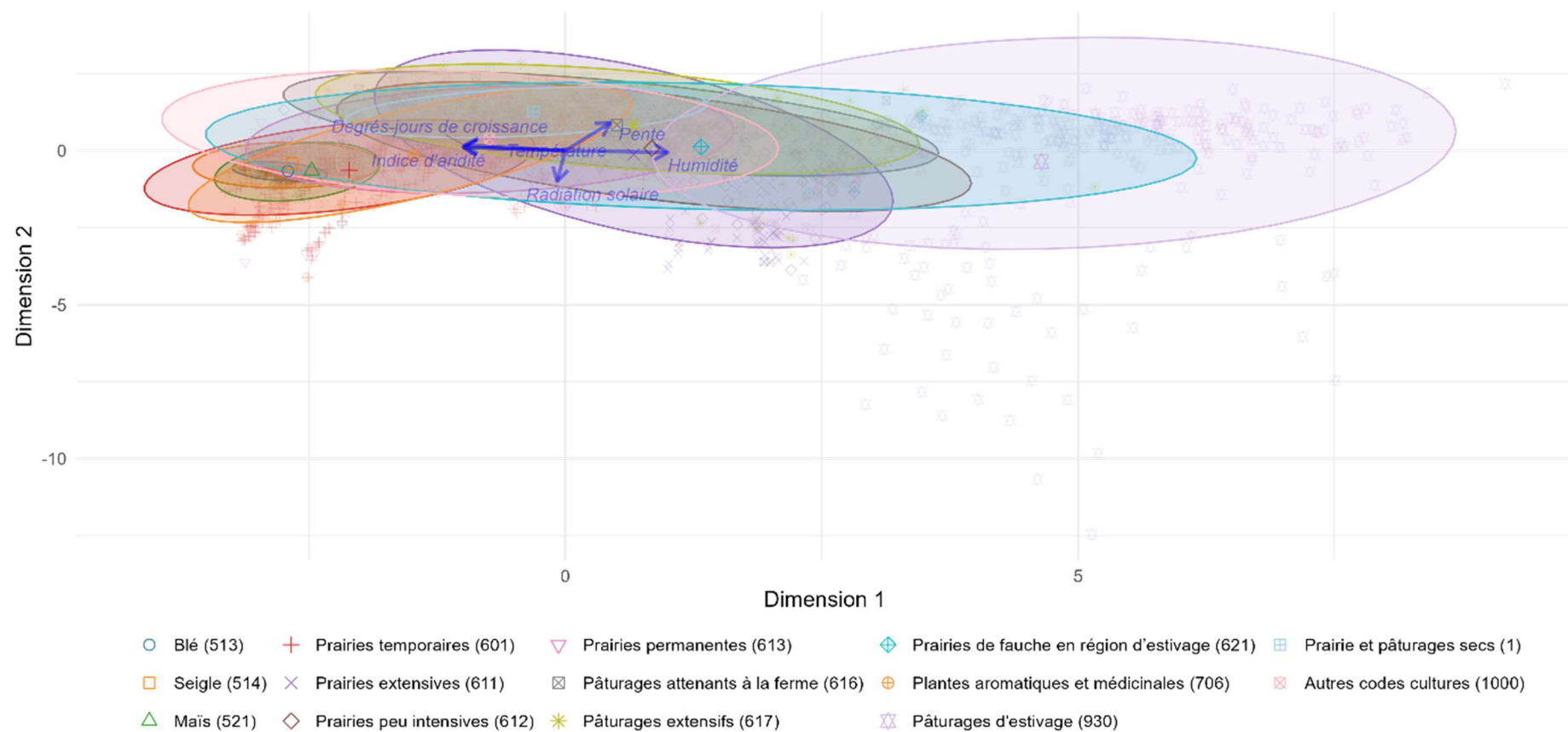


Figure 30: Ordination NMDS des parcelles agricoles d'Entremont selon leurs variables environnementales. Les couleurs et formes indiquent les types d'usage du sol ; les ellipses montrent la dispersion de chaque groupe et les flèches les principaux gradients environnementaux.

6.1.1.2 NMDS Gruyère

L'ordination NMDS réalisée sur les variables environnementales des parcelles agricoles de la Gruyère montre également une très bonne qualité de représentation (fig. 31). Le stress de la configuration est faible (0,075), attestant d'une bonne adéquation entre les distances originales et leur projection dans l'espace réduit. Cette qualité est confirmée par un coefficient de Mantel élevé ($r = 0,990$, $p = 0,001$) ainsi qu'un coefficient de Shepard ($R^2 = 0,979$), indiquant que les dissimilarités environnementales entre parcelles sont fidèlement préservées.

Comme pour Entremont, l'ordination met en évidence deux axes principaux structurant l'espace environnemental : un gradient thermique dominant sur la première dimension et un gradient topographique sur la seconde. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par l'ACP, bien que la NMDS permette ici aussi de mieux visualiser l'hétérogénéité des groupes et l'amplitude écologique des différents types d'usages du sol à travers la forme et l'étendue des ellipses de dispersion.

À nouveau, le cluster des différentes cultures (blé (code 513) et maïs (code 521)) ainsi que des prairies temporaires (code 601) confirme leur présence dans des conditions planes et chaudes. La seule parcelle de seigle (code 514) présente des conditions plus arides encore, mais, puisqu'il n'y a qu'une seule parcelle, cette valeur ne peut être utilisée qu'à des fins de comparaisons et non d'analyse en soi. Les conditions de ce cluster sont cependant relativement restreintes, visible par la forme relativement circulaire des différentes ellipses.

Les prairies et pâturages présentent aussi un chevauchement marqué et des ellipses nettement plus grandes, de la même manière qu'en Entremont. Cependant, les ellipses sont beaucoup moins étendues, reflétant des conditions climatiques nettement moins variables. Les différentes prairies (peu intensives (code 612) et permanentes (code 613)) ont des conditions à nouveau plus plates et chaudes que les pâturages (attendants à la ferme (code 616) et extensifs (code 617)) et les prairies extensives (code 611). Cependant, les ellipses de ces différentes catégories se chevauchent toutes en grande partie, signifiant à nouveau une superposition des conditions et une grande variabilité inter catégorielle.

À nouveau, les pâturages d'estivage (code 930) et les prairies de fauche en région d'estivage présentent des conditions plus fraîches et plus pentues que les autres types de gestions.

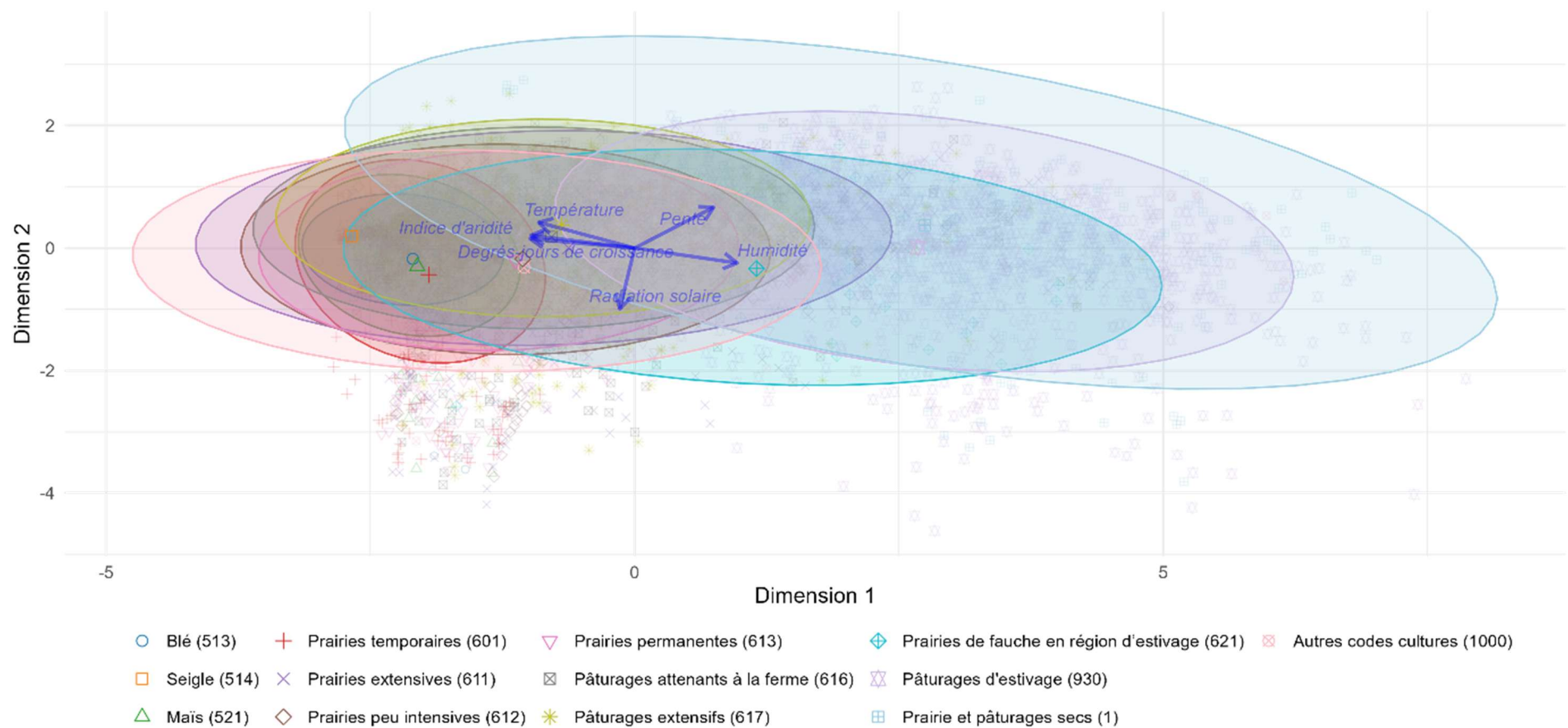


Figure 31: Ordination NMS des parcelles agricoles de la Gruyère selon leurs variables environnementales. Les couleurs et formes indiquent les types d'usage du sol ; les ellipses montrent la dispersion de chaque groupe et les flèches les principaux gradients environnementaux

ANNEXE 6 : VALEURS QUANTITATIVES DE L'ÉVOLUTION DES POTENTIELS DE GESTION

Type de culture	Entremont		Gruyère	
	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
<i>Prairies et pâturages secs</i>	3601	1383	18387	7962
<i>Seigle</i>	2712	525		
<i>Maïs</i>	929	618	8925	6967
<i>Prairies temporaires</i>	1351	952	10082	7899
<i>Prairies extensives</i>	6375	2676	19871	14588
<i>Prairies peu intensives</i>	5013	1756	16206	12 615
<i>Pâturages attenants à la ferme</i>	9947	2583	13806	10 429
<i>Prairies de fauche en région d'estivage</i>	11328	3449	19531	12223
<i>Plantes aromatiques et médicinales</i>	5122	1529		
<i>Autre</i>	3416	1646	17622	13669

Projection à 2035								
Type de culture	Entremont				Gruyère			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
<i>Prairies et pâturages secs</i>	17 %	24 %	-72 %	-69 %	17 %	28 %	12 %	20 %
<i>Seigle</i>	-49 %	-27 %	-40 %	-31 %				
<i>Maïs</i>	95 %	113 %	-31 %	-26 %	6 %	4 %	-5%	-7%
<i>Prairies temporaires</i>	135 %	147 %	98 %	108 %	12 %	10 %	-8%	-11 %
<i>Prairies extensives</i>	-29 %	-9%	-6%	11 %	11 %	6 %	29 %	19 %
<i>Prairies peu intensives</i>	22 %	57 %	104 %	160 %	-27 %	-29 %	-1%	-7%
<i>Pâturages attenants à la ferme</i>	50 %	52 %	56 %	67 %	29 %	24 %	61 %	51 %
<i>Prairies de fauche en région d'estivage</i>	-56 %	-45 %	5 %	29 %	-30 %	-37 %	-27 %	-31 %
<i>Plantes aromatiques et médicinales</i>	123 %	177 %	41 %	60 %				
<i>Autre</i>	69 %	69 %	26 %	19 %	5 %	-1%	24 %	17 %

Projection à 2060								
Type de culture	Entremont				Gruyère			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
<i>Prairies et pâturages secs</i>	-63 %	-58 %	13 %	19 %	39 %	63 %	59 %	95 %
<i>Seigle</i>	-83 %	-86 %	-23 %	28 %				
<i>Maïs</i>	36 %	49 %	124 %	143 %	6 %	4 %	4 %	1 %
<i>Prairies temporaires</i>	226 %	228 %	339 %	301 %	11 %	8 %	9 %	6 %
<i>Prairies extensives</i>	0 %	15 %	-6%	7 %	39 %	26 %	56 %	39 %
<i>Prairies peu intensives</i>	23 %	78 %	24 %	77 %	-34 %	-38 %	-63 %	-63 %
<i>Pâturages attenants à la ferme</i>	70 %	80 %	81 %	101 %	67 %	55 %	68 %	55 %
<i>Prairies de fauche en région d'estivage</i>	-54 %	-47 %	-70 %	-72 %	-48 %	-52 %	-52 %	-59 %
<i>Plantes aromatiques et médicinales</i>	227 %	276 %	217 %	263 %				
<i>Autre</i>	4 %	-6%	114 %	92 %	-13 %	-23 %	-20 %	-28 %

Projection à 2085								
Type de culture	Entremont				Gruyère			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
<i>Prairies et pâturages secs</i>	53 %	42 %	99 %	68 %	47 %	77 %	119 %	197 %
<i>Seigle</i>	53 %	146 %	4 %	80 %				
<i>Maïs</i>	116 %	132 %	324 %	341 %	3 %	0 %	6 %	4 %
<i>Prairies temporaires</i>	226 %	227 %	634 %	407 %	3 %	0 %	12 %	9 %
<i>Prairies extensives</i>	-32 %	-22 %	-20 %	-16 %	57 %	39 %	81 %	61 %
<i>Prairies peu intensives</i>	82 %	163 %	-27 %	15 %	-60 %	-62 %	-58 %	-58 %
<i>Pâturages attenants à la ferme</i>	68 %	87 %	102 %	125 %	64 %	50 %	77 %	62 %
<i>Prairies de fauche en région d'estivage</i>	-43 %	-35 %	-96%	-100 %	-41 %	-48 %	-72 %	-79 %
<i>Plantes aromatiques et médicinales</i>	132 %	186 %	314 %	381 %				
<i>Autre</i>	175 %	150 %	235 %	182 %	-16 %	-26 %	-26 %	-33 %

Projection à 2035 - hectares								
Type de culture	Entremont				Gruyère			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
Prairies et pâturages secs	4231	1709	992	434	21599	10195	20648	9562
Blé	597	441	232	163	11 537	8918	12263	9434
Seigle	1386	384	1634	365				
Maïs	1810	1316	643	455	9459	7265	8456	6493
Prairies temporaires	3171	2348	2668	1980	11293	8707	9258	7025
Prairies extensives	4508	2443	5974	2967	22083	15485	25558	17320
Prairies peu intensives	6116	2751	10212	4557	11860	8901	16005	11 740
Prairies permanentes	1570	880	1689	954	12365	9506	13408	10198
Pâturages attenants à la ferme	14 900	3920	15472	4307	17827	12 915	22195	15755
Pâturages extensifs	21220	6349	21461	6663	26647	17587	27002	17516
Prairies de fauche en région d'estivage	5039	1903	11930	4466	13 634	7750	14186	8475
Plantes aromatiques et médicinales	11410	4229	7247	2446				
Pâturages d'estivage	38443	6913	40494	7934	25582	14831	27870	15683
Autre	5769	2783	4315	1954	18500	13517	21887	15933

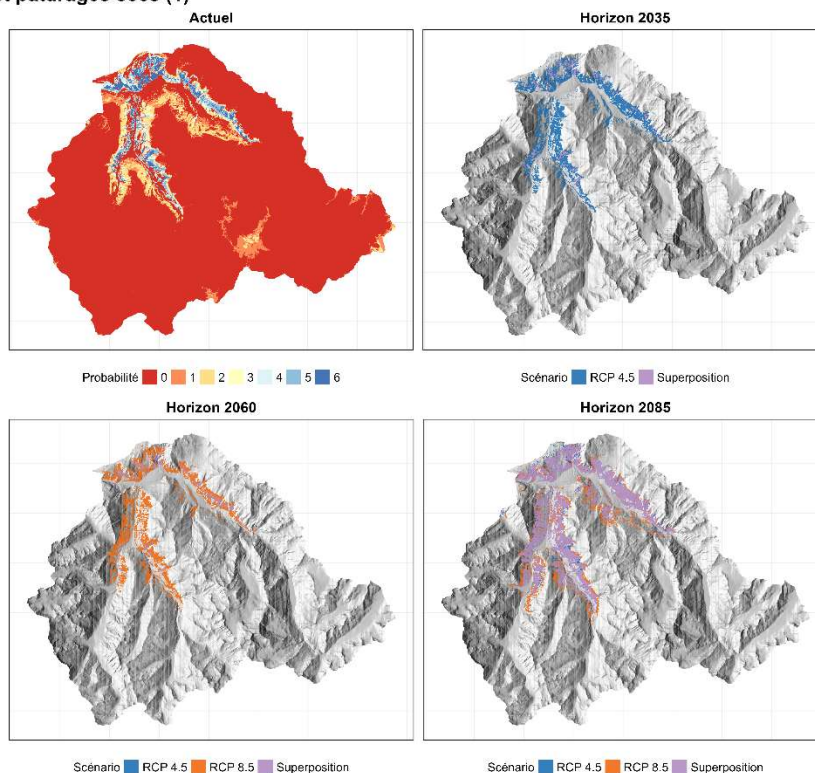
Projection à 2060 - hectares								
Type de culture	Entremont				Gruyère			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
Prairies et pâturages secs	1325	583	4070	1648	25518	12978	29264	15563
Blé	623	456	784	580	12 530	9631	12352	9503
Seigle	458	72	2100	671				
Maïs	1266	921	2083	1503	9498	7229	9262	7014
Prairies temporaires	4401	3125	5932	3815	11158	8498	10 975	8358
Prairies extensives	6367	3078	6000	2873	27631	18397	31056	20250
Prairies peu intensives	6156	3130	6213	3104	10731	7792	6059	4658
Prairies permanentes	1611	763	1490	803	10433	7725	11114	8223
Pâturages attenants à la ferme	16928	4644	18009	5197	23049	16170	23253	16169
Pâturages extensifs	22119	6687	23974	7343	34448	22125	37628	23997
Prairies de fauche en région d'estivage	5218	1819	3377	980	10060	5925	9286	5065
Plantes aromatiques et médicinales	16770	5753	16238	5545				
Pâturages d'estivage	35242	5354	30900	3182	21434	12 725	12574	8059
Autre	3560	1554	7308	3158	15382	10 528	14022	9776

Projection à 2085 - hectares								
Type de culture	Entremont				Gruyère			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
Prairies et pâturages secs	5524	1958	7159	2320	27080	14064	40301	23629
Blé	388	290	1639	1153	12181	9386	12022	9229
Seigle	4158	1294	2815	943				
Maïs	2003	1433	3941	2722	9163	6961	9490	7231
Prairies temporaires	4409	3112	9915	4824	10 427	7922	11 290	8602
Prairies extensives	4307	2099	5082	2258	31191	20210	36004	23481
Prairies peu intensives	9103	4618	3681	2017	6509	4832	6782	5328
Prairies permanentes	1170	587	757	474	11257	8299	11171	8431
Pâturages attenants à la ferme	16728	4820	20096	5824	22583	15657	24466	16876
Pâturages extensifs	23858	7431	25612	7314	34234	21803	43268	27170
Prairies de fauche en région d'estivage	6469	2234	400	3	11 546	6360	5444	2603
Plantes aromatiques et médicinales	11 873	4375	21203	7355				
Pâturages d'estivage	34433	4810	21184	299	13674	8692	2818	1770
Autre	9406	4120	11437	4645	14781	10172	12984	9167

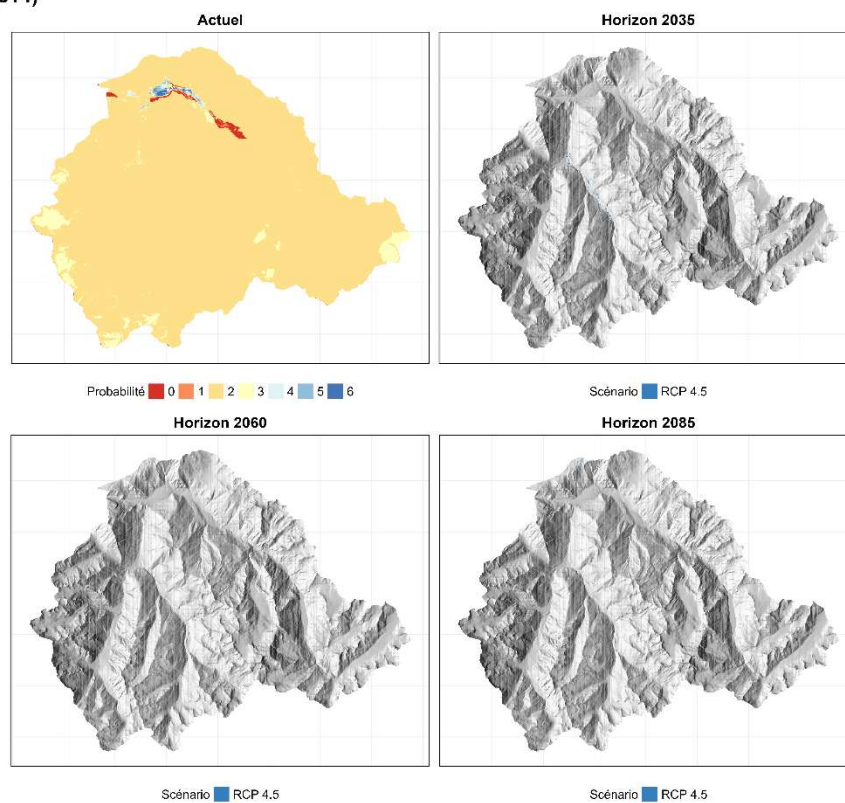
ANNEXE 7 : EVOLUTION DES NICHES CLIMATIQUES DES DIFFÉRENTS *CODES CULTURES* SELON LES HORIZONS ET LES SCENARII

ENTREMONT

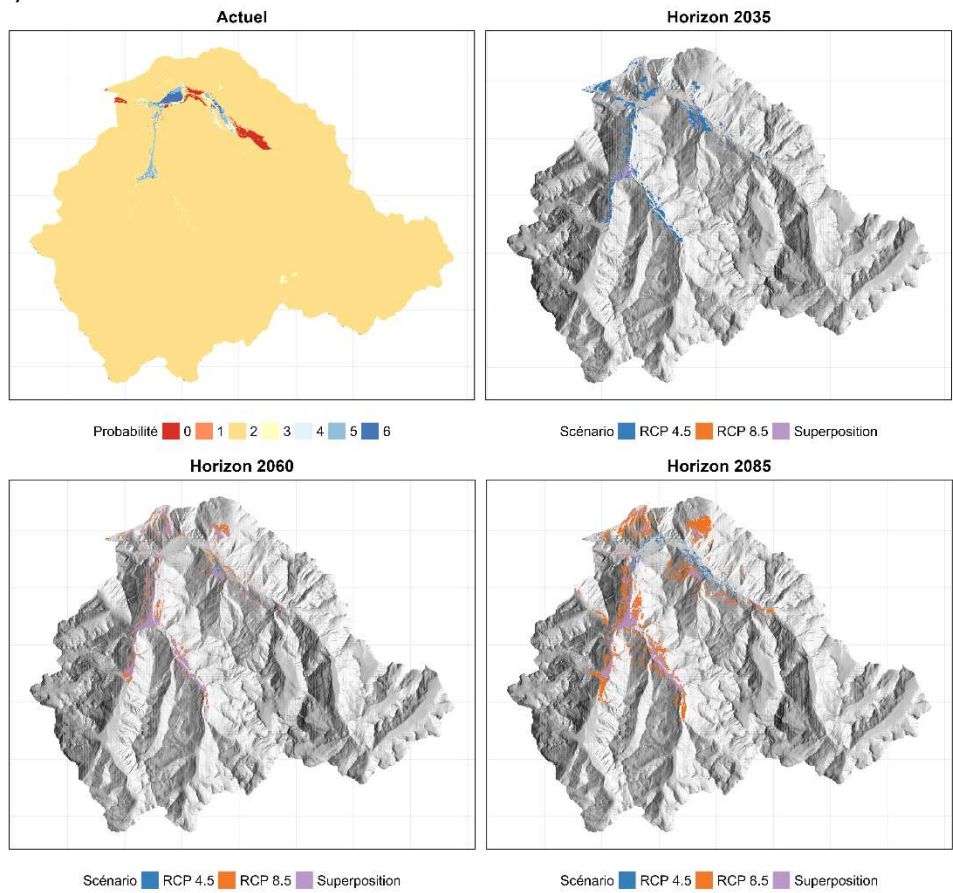
Prairie et pâturages secs (1)



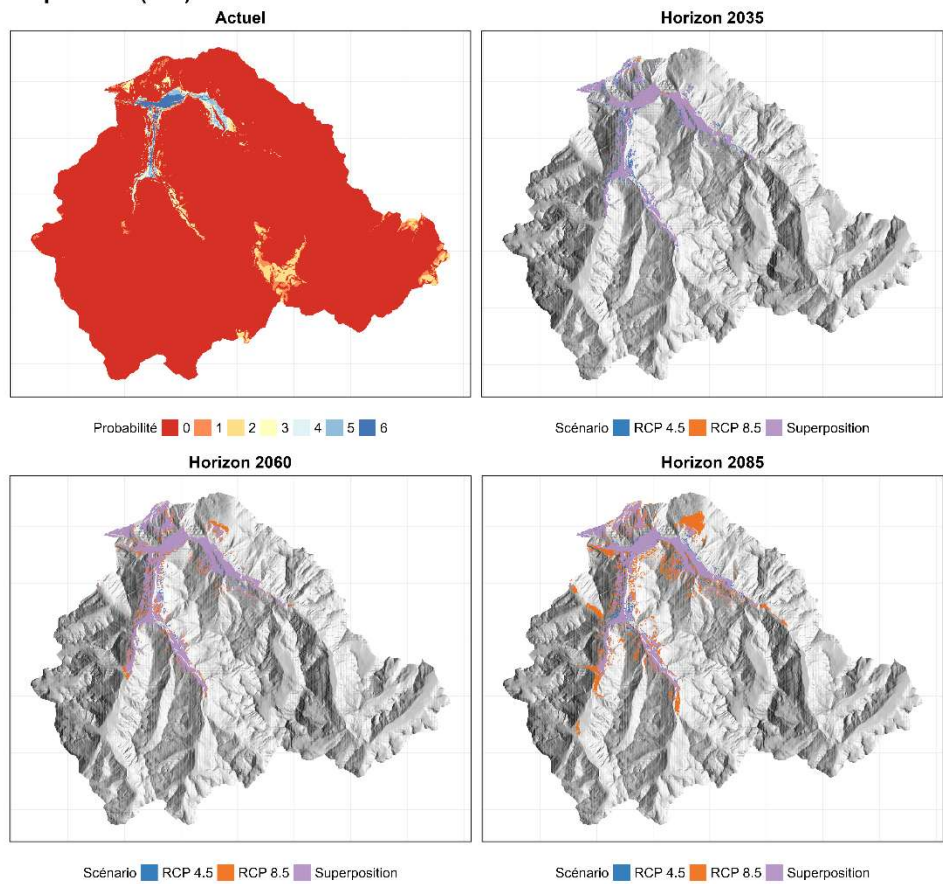
Seigle (514)



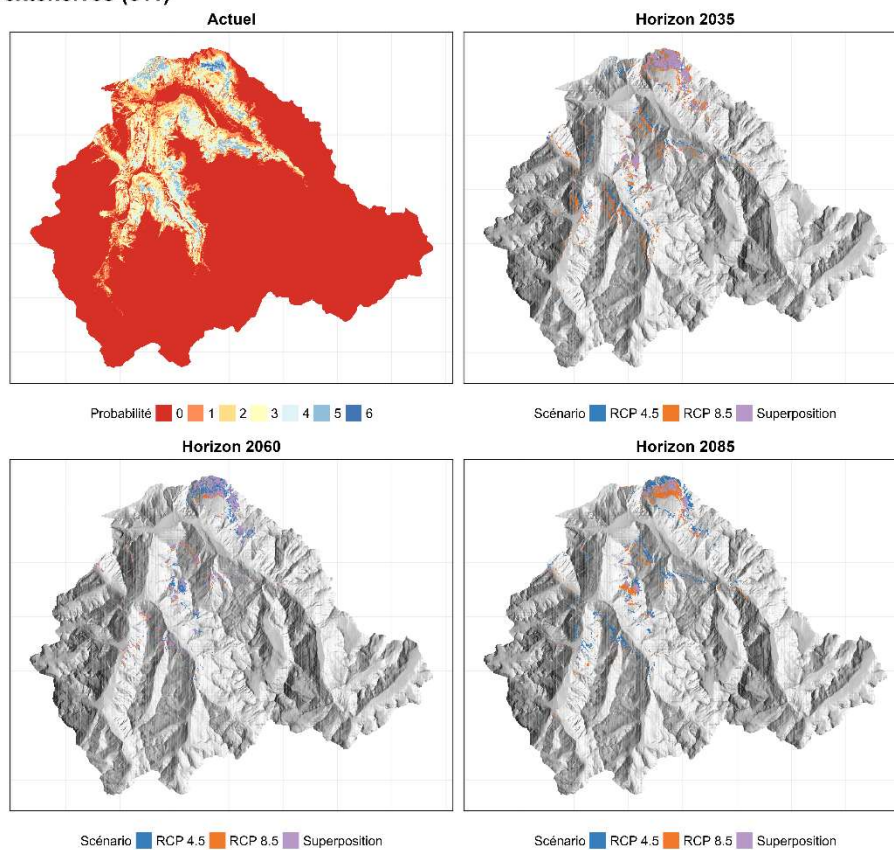
Maïs (521)



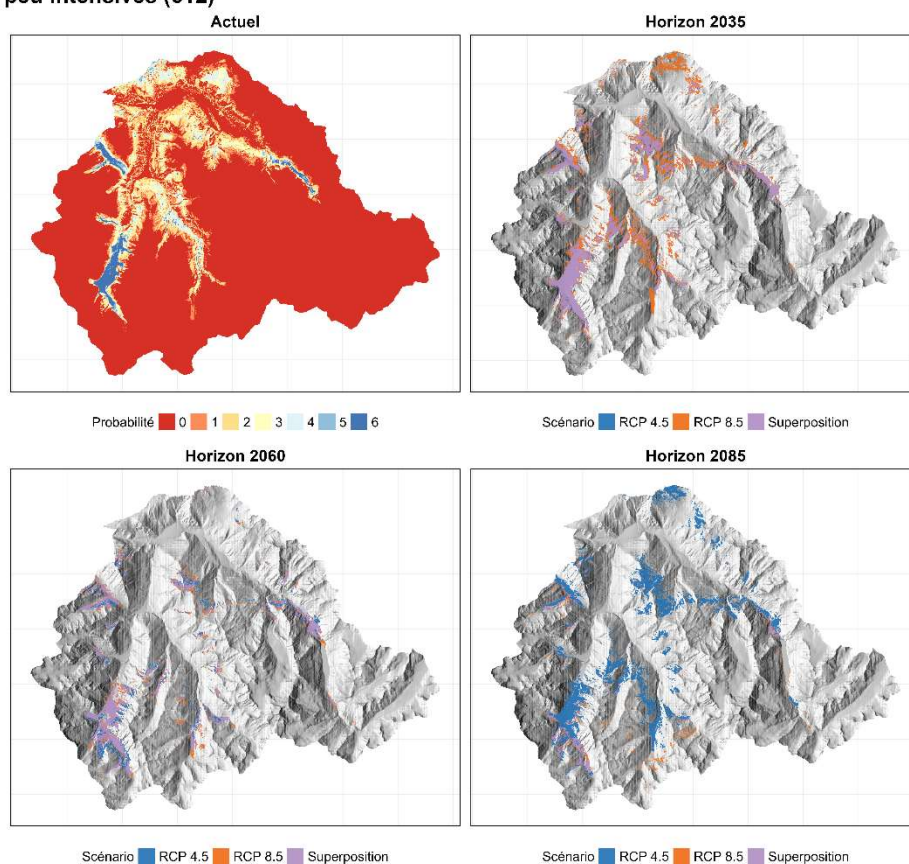
Prairies temporaires (601)



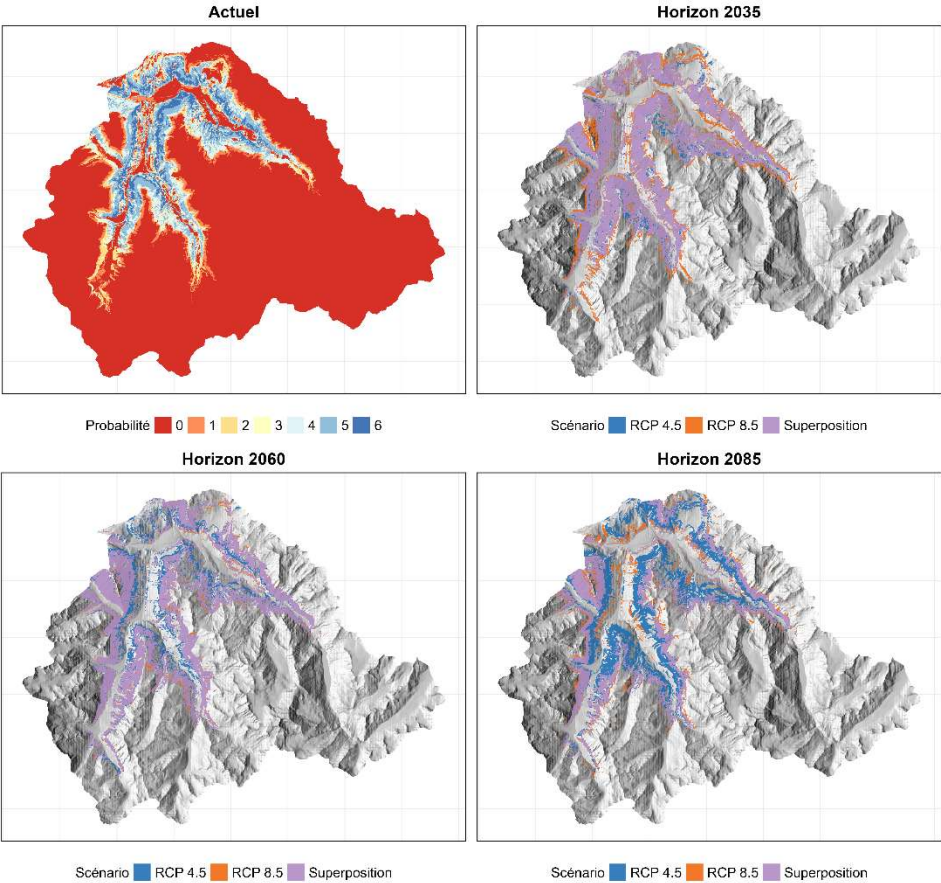
Prairies extensives (611)



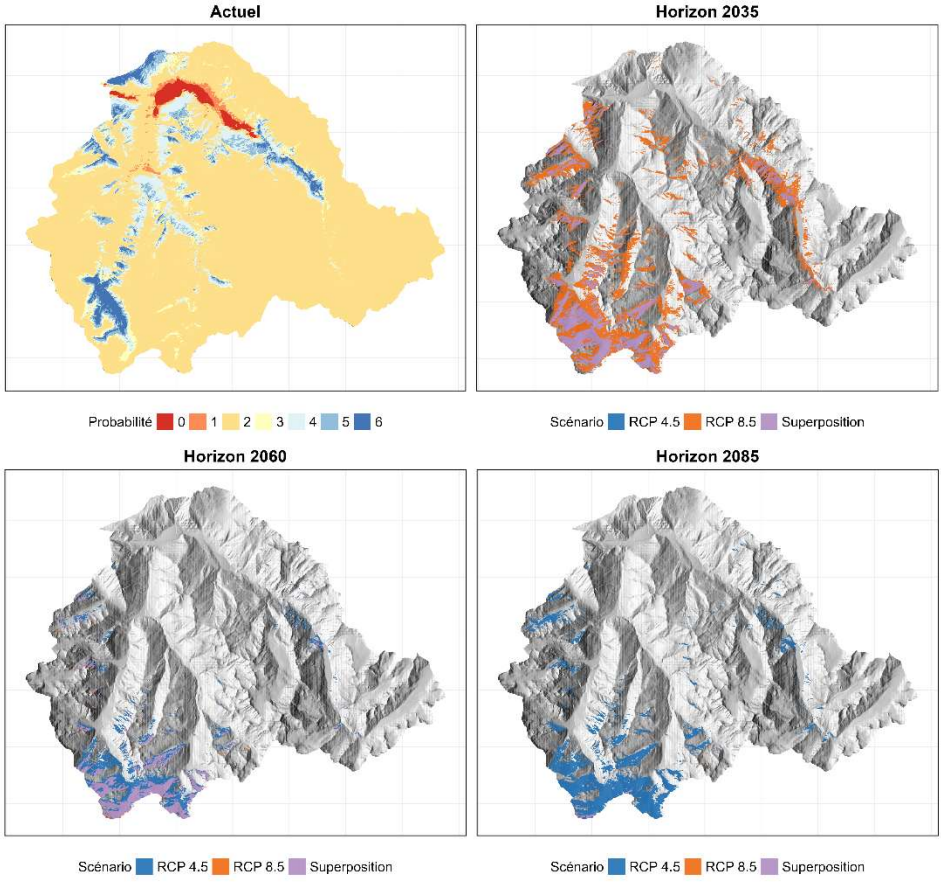
Prairies peu intensives (612)



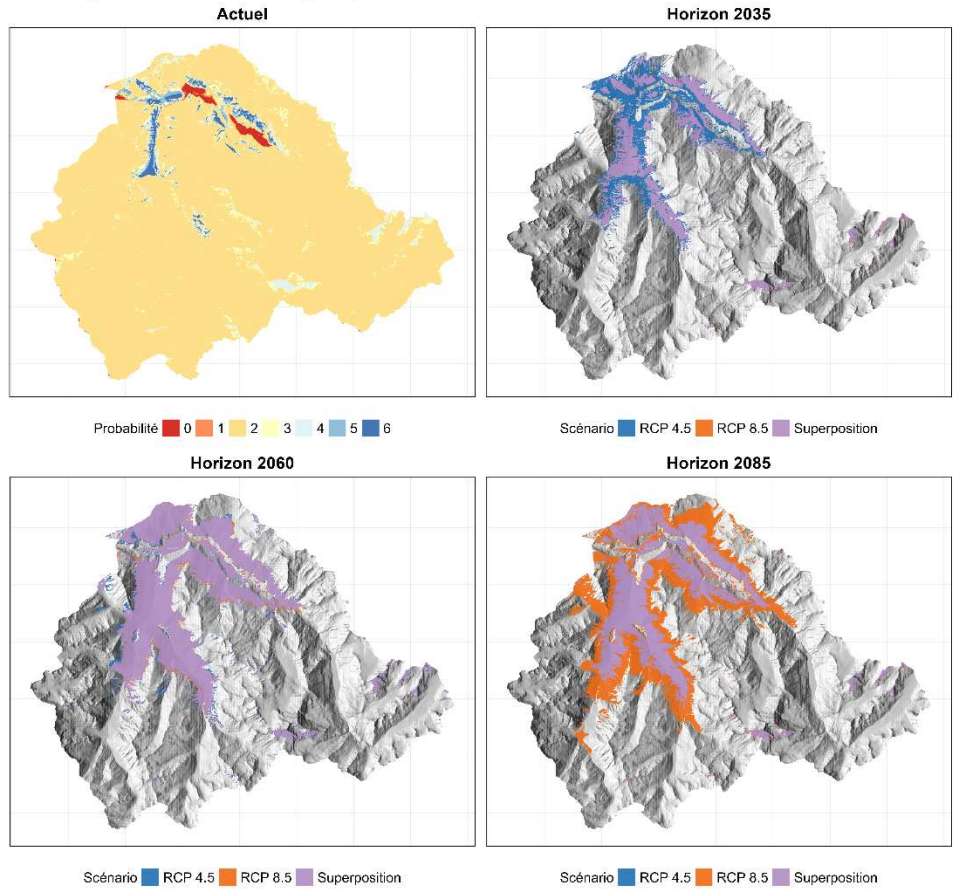
Pâturages attenants à la ferme (616)



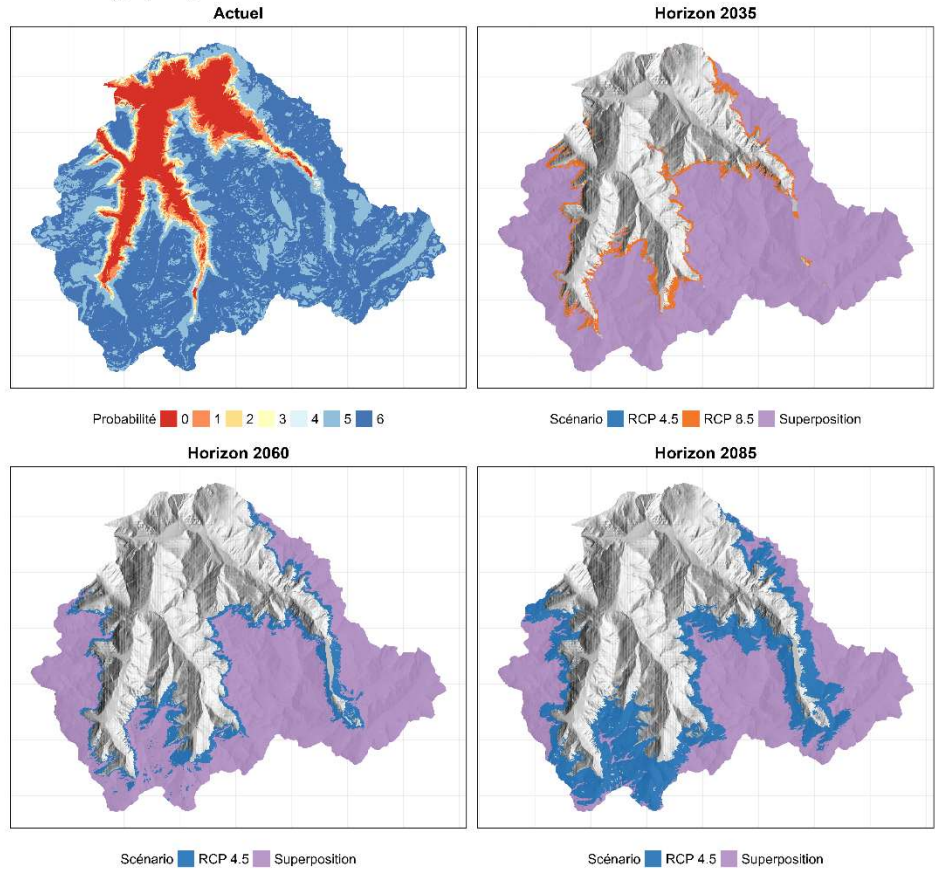
Prairies de fauche en région d'estivage (621)



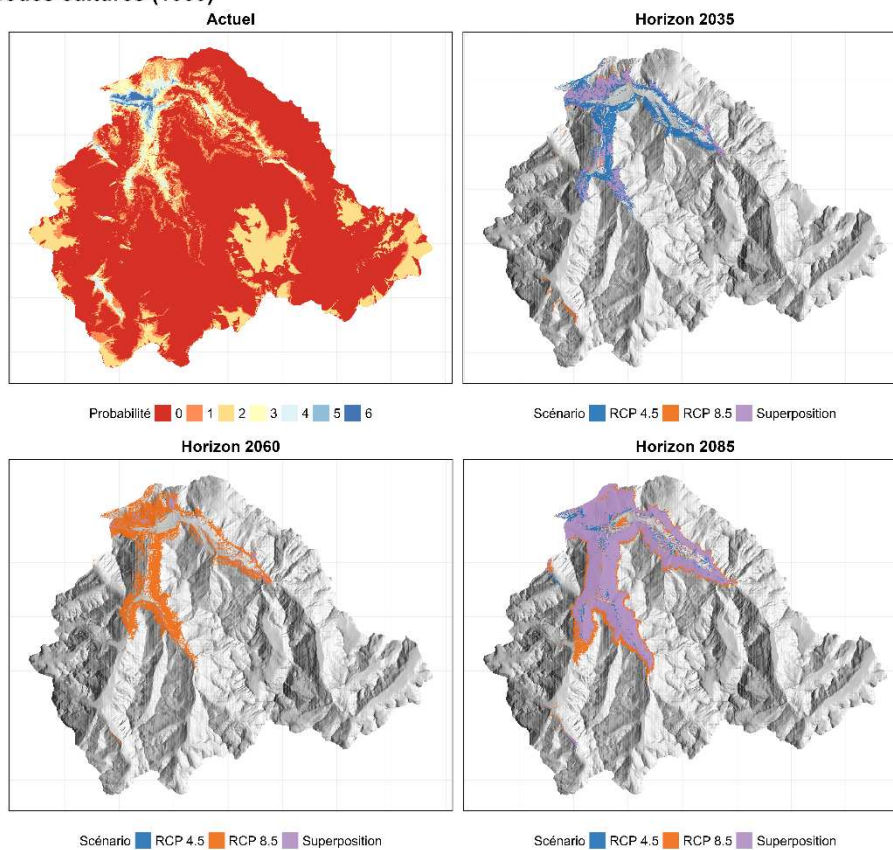
Plantes aromatiques et médicinales (706)



Pâturages d'estivage (930)

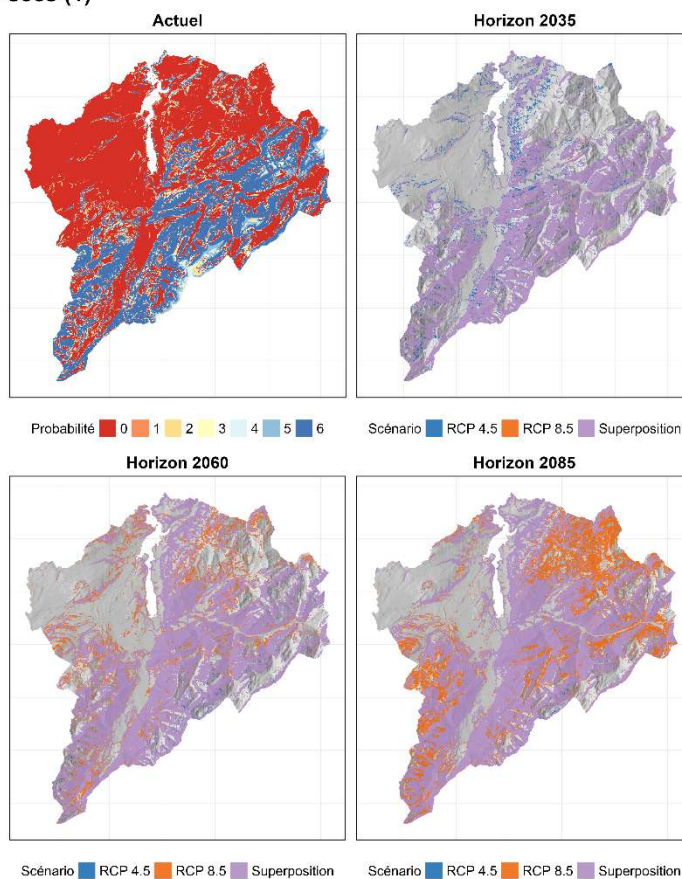


Autres codes cultures (1000)

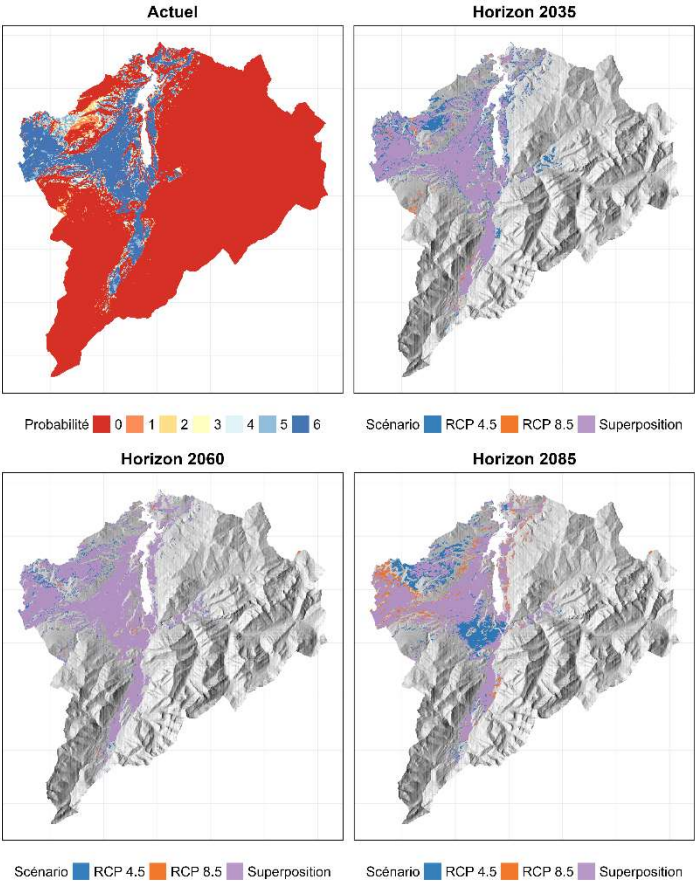


GRUYÈRE

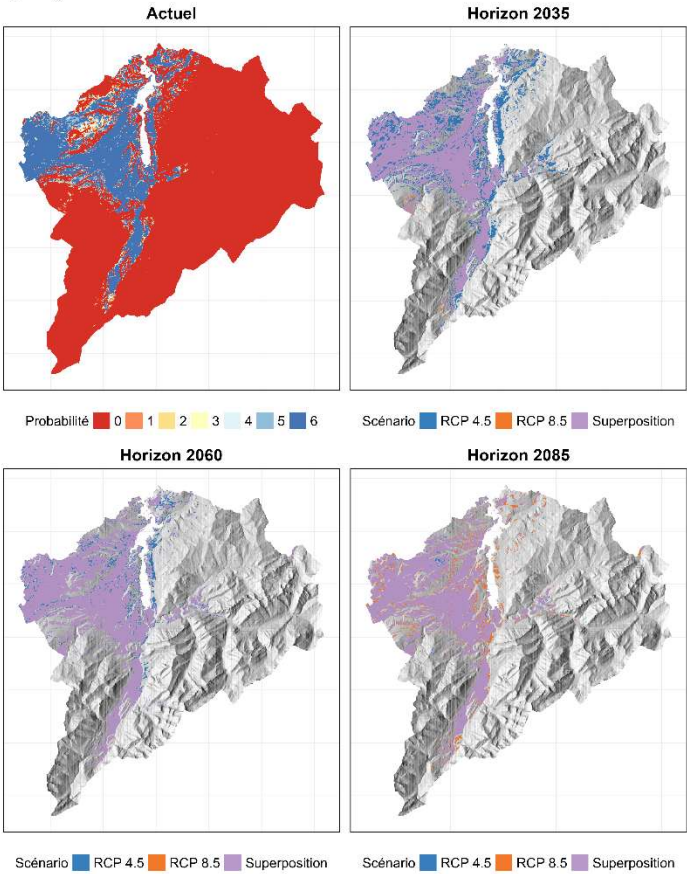
Prairie et pâturages secs (1)



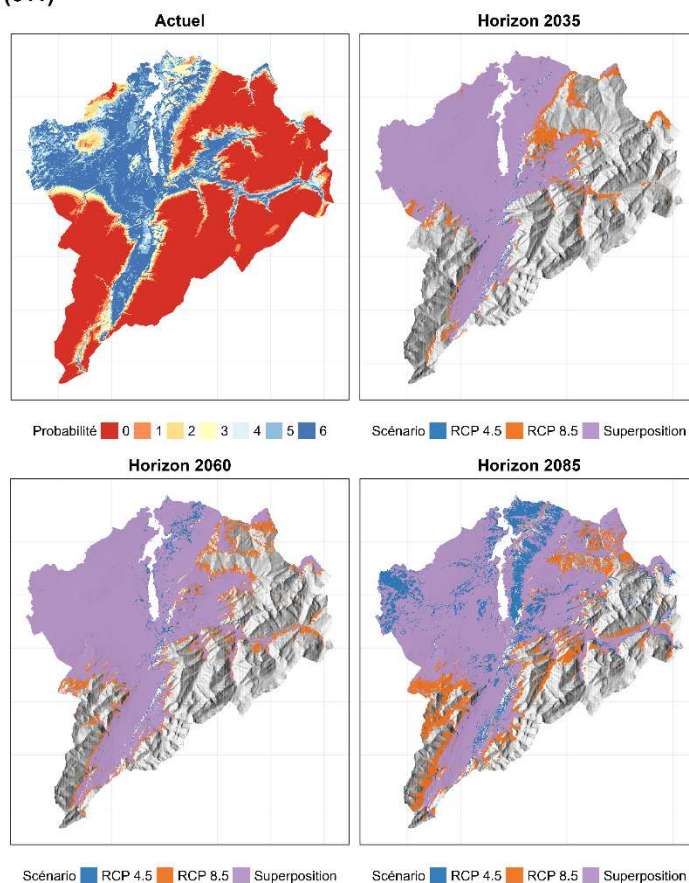
Maïs (521)



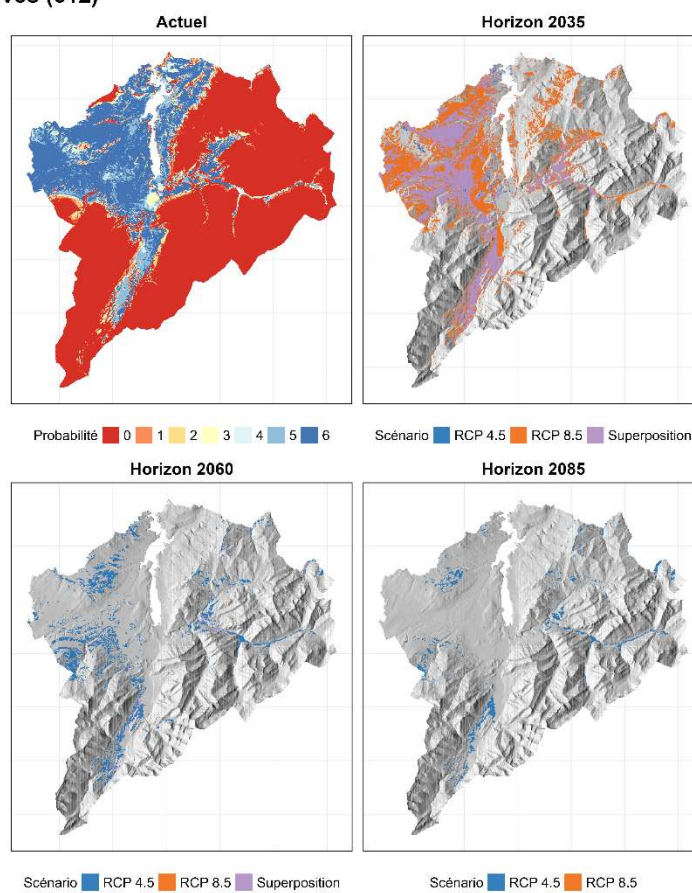
Prairies temporaires (601)



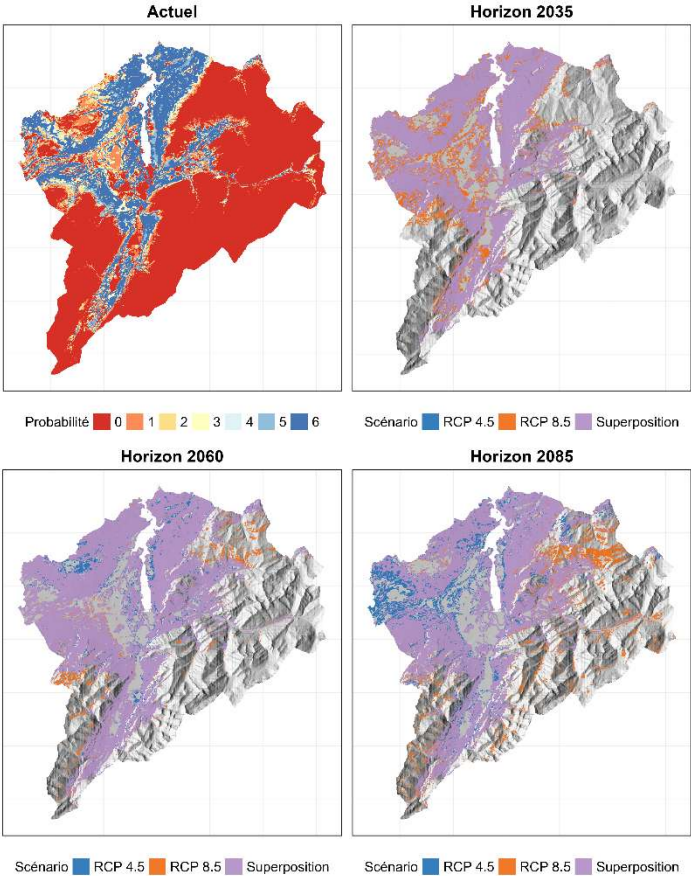
Prairies extensives (611)



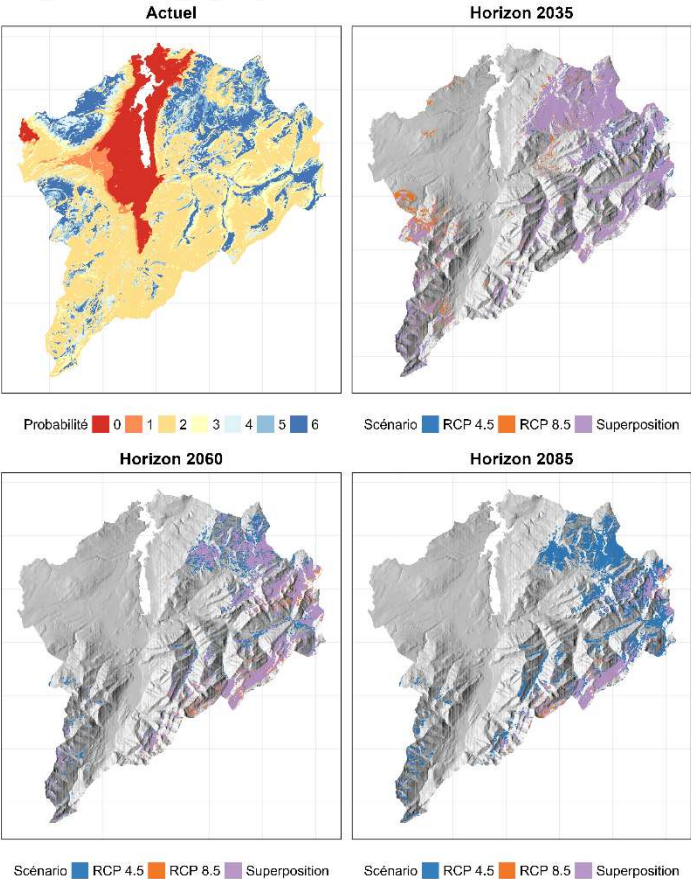
Prairies peu intensives (612)



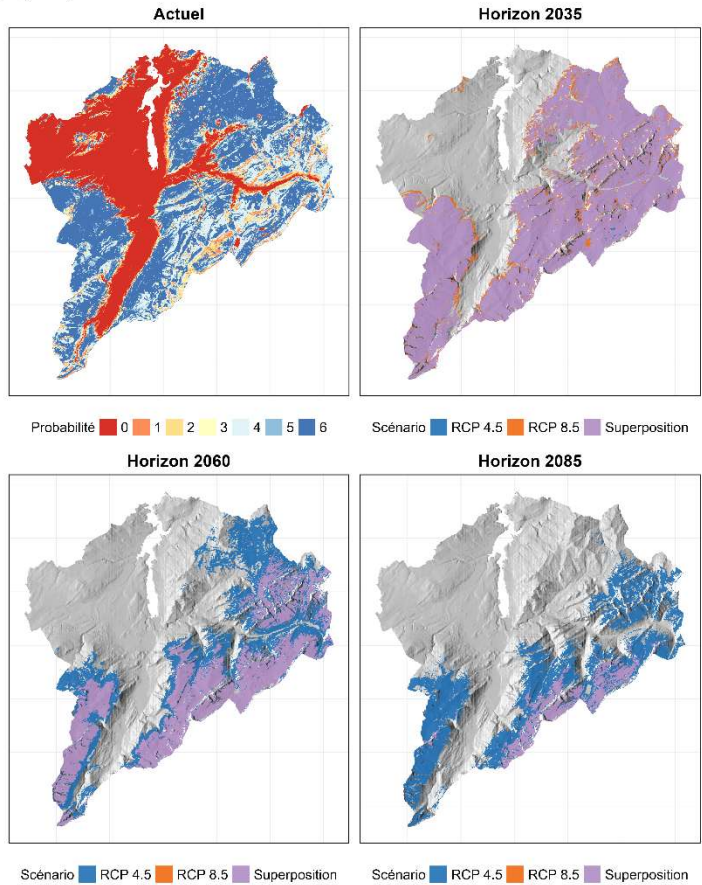
Pâturages attenants à la ferme (616)



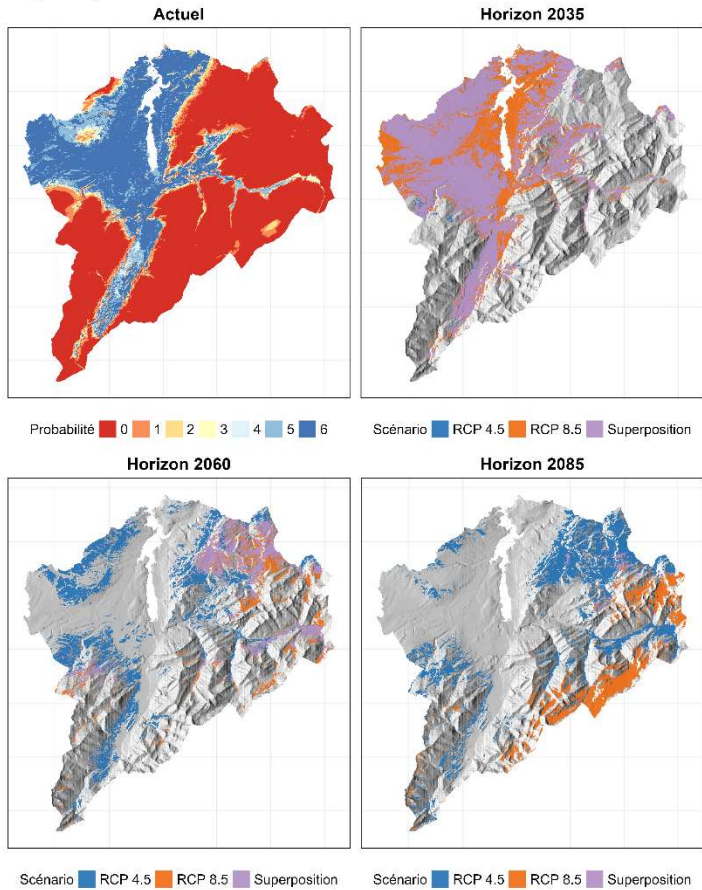
Prairies de fauche en région d'estivage (621)



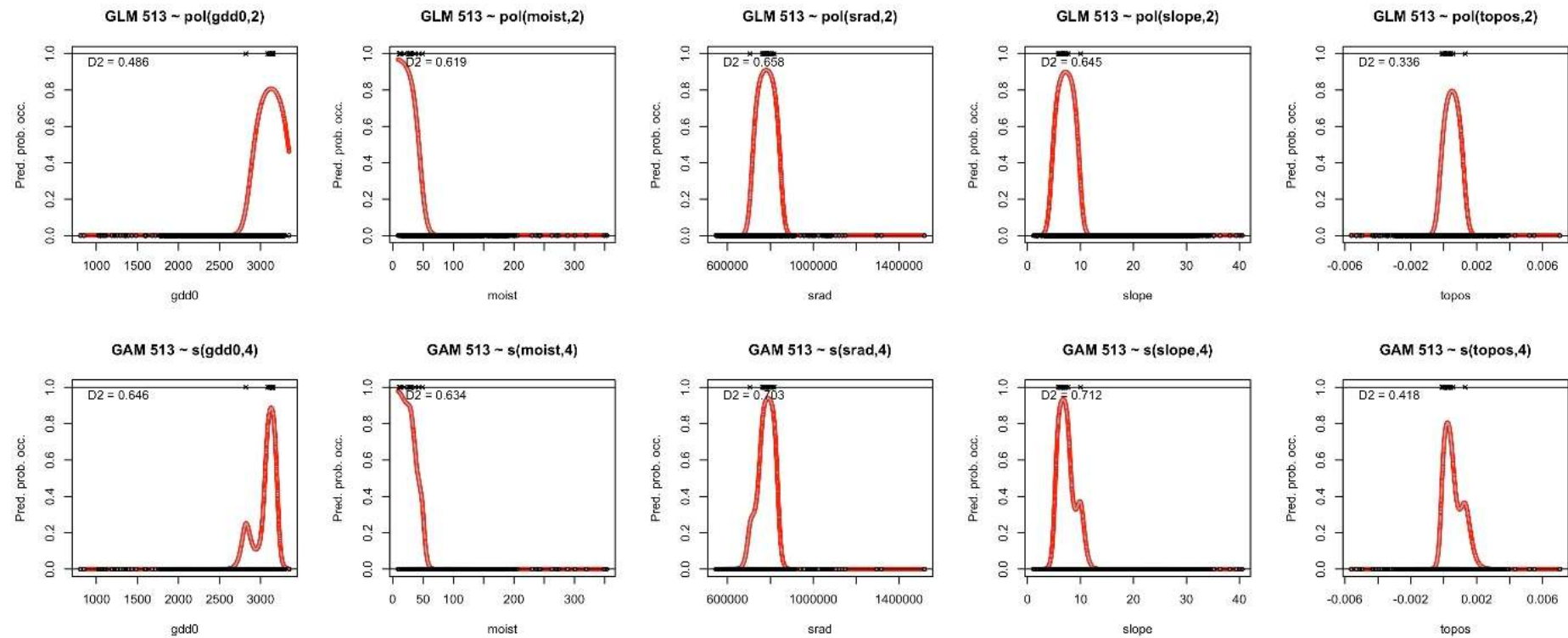
Pâturages d'estivage (930)



Autres codes cultures (1000)



ANNEXE 8 : ILLUSTRATION DE LA COURBE RÉPONSE DU BLÉ EN ENTREMONT



ANNEXE 9 : SURFACES STABLES PAR TYPE DE GESTION, HORIZON ET SCENARII CLIMATIQUE

Code culture	Horizons	Entremont		Gruyère	
		Non contraint	Contraint	Non contraint	Contraint
Prairies et pâturages secs	2035	370,3125 ha	108,0625 ha	17518,1875 ha	5673,25 ha
	2060	410,75 ha	101 ha	22533,5 ha	8619,1875 ha
	2085	4355,75 ha	1056,4375 ha	24454,75 ha	9736,25 ha
Seigle	2035	0 ha	0 ha		
	2060	0 ha	0 ha		
	2085	0 ha	0 ha		
Maïs	2035	165,875 ha	65,0625 ha	6822,875 ha	4582,125 ha
	2060	801,25 ha	400,375 ha	7932,6875 ha	5231 ha
	2085	895,8125 ha	447,625 ha	6210,1875 ha	4098,1875 ha
Pâturages d'estivage	2035	36942,1 ha	5743,7 ha	24016,8 ha	11808,8 ha
	2060	29079,5 ha	2292,9 ha	10220,4 ha	5725,8 ha
	2085	18565,4 ha	80,2 ha	2243,1 ha	1189,1 ha
Prairies permanentes	2035	2221,5 ha	1142,625 ha	7669,5 ha	5102,875 ha
	2060	3109 ha	1595,5625 ha	9150,4375 ha	6112,25 ha
	2085	2785,75 ha	1410,4375 ha	7901,125 ha	5224,875 ha
Prairies extensives	2035	731,5625 ha	465,3125 ha	20651,9375 ha	12941,75 ha
	2060	842,3125 ha	455,5625 ha	25009,3125 ha	14891,1875 ha
	2085	384,625 ha	235,75 ha	23590,375 ha	13355,5 ha
Prairies peu intensives	2035	2937,5625 ha	1230,125 ha	5821,625 ha	3765,625 ha
	2060	1976,875 ha	807,9375 ha	188,75 ha	76,6875 ha
	2085	549,0625 ha	278,9375 ha	0 ha	0 ha
Pâturages attenants à la ferme	2035	9432,9375 ha	1192,375 ha	15905,5625 ha	10119,8125 ha
	2060	8583,3125 ha	1216,9375 ha	19593,1875 ha	11945,1875 ha
	2085	5071,9375 ha	746,5625 ha	17169,8125 ha	10188,625 ha
Prairies de fauche en région d'estivage	2035	3343,375 ha	1072,9375 ha	8326,5 ha	4924,6875 ha
	2060	1910,0625 ha	372,25 ha	4407,0625 ha	2817,1875 ha
	2085	64,4375 ha	0 ha	1678,75 ha	1196,25 ha
Plantes aromatiques et médicinales	2035	4440,25 ha	1341,4375 ha		
	2060	11084,3125 ha	2851,8125 ha		
	2085	7734,9375 ha	2203,8125 ha		
Autre	2035	1567,5 ha	440,75 ha	14495,1875 ha	9367 ha
	2060	277,625 ha	17,875 ha	2901,25 ha	1433,5625 ha
	2085	7049,625 ha	1921,5 ha	333,6875 ha	177,4375 ha