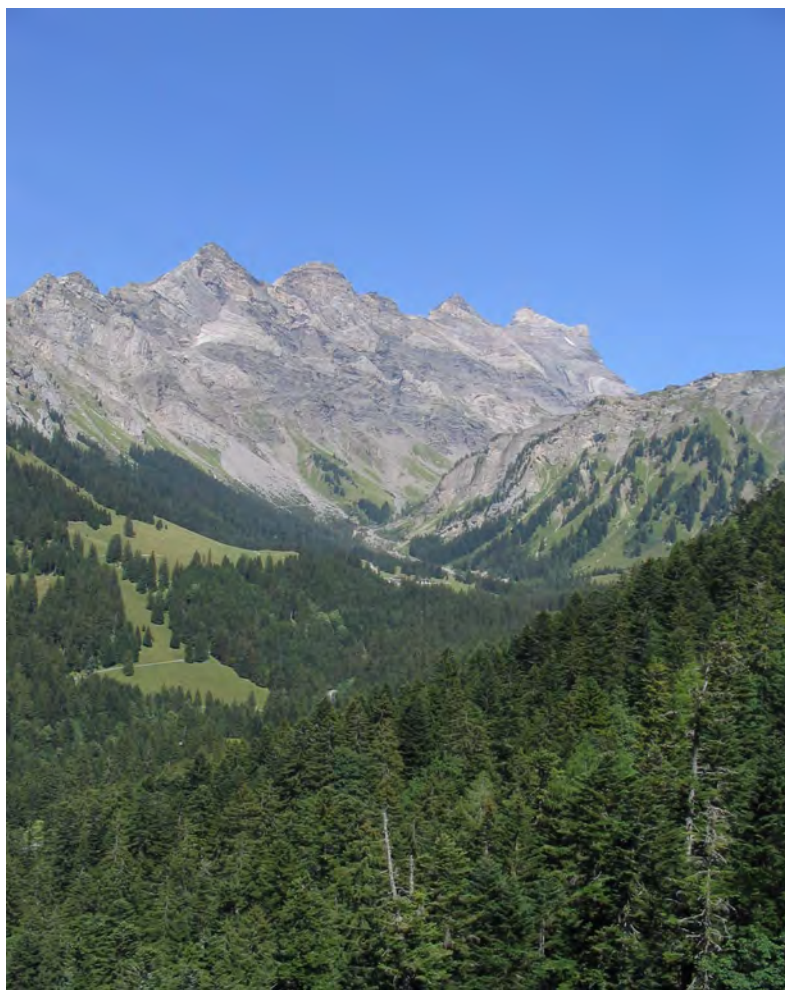




Université de Lausanne

Institut d'Ecologie et
de Botanique systématique et géobotanique

Modélisation de la distribution spatiale de huit espèces emblématiques et scénarios de changements climatiques dans les Préalpes vaudoises



Hélène Jaccard et Roxane Milleret
sous la direction de Simone Peverelli

1 TABLE DES MATIÈRES

1	TABLE DES MATIÈRES.....	1
2	RÉSUMÉ	2
3	INTRODUCTION	3
3.1	Preuves du changement climatique et conséquences pour les plantes	3
3.2	Qu'en est-il de la Suisse ?	5
3.3	Facteurs biotiques et abiotiques	5
3.4	Cadre et but de l'étude	6
4	MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	7
4.1	Site d'étude	7
4.2	Espèces étudiées.....	8
4.3	Echantillonnage.....	10
4.4	Données environnementales	10
4.5	Analyses statistiques	11
4.5.1	GLM stepwise exploratoire	11
4.5.2	GLM.....	12
4.5.3	GAM.....	12
4.5.4	Comparaison GLM/GAM	13
4.5.5	Changements climatiques.....	13
4.5.6	Evaluation par approche sur le terrain	13
5	RÉSULTATS	14
5.1	GLM.....	14
5.2	GAM	17
5.3	Comparaison GLM/GAM.....	19
5.4	Evaluation par approche sur le terrain.....	20
5.5	Scénarios de Changements climatiques	21
6	DISCUSSION.....	24
7	REMERCIEMENTS	32
8	BIBLIOGRAPHIE	32
9	ANNEXE.....	35

2 RÉSUMÉ

Au cours de ces dernières décennies, l'importance croissante des logiciels de systèmes d'information géographique et statistiques, a permis le développement de différents modèles prédictifs de distribution d'habitat d'espèces végétales et/ou animales. Ce travail s'intègre dans une étude plus large visant à modéliser la distribution des plantes dans le cadre des changements climatiques dans les milieux ouverts de la région des Préalpes vaudoises. Il se divise en trois parties. (1) la création de cartes potentielles prédictives de l'habitat de huit espèces au moyen de GLM et de GAM grâce au module GRASP (Lehmann *et al.*, 2002). Pour S-plus, les modèles GAM expliquent plus de déviance que les GLM en utilisant moins de prédicteurs pour y parvenir, ce qui peut s'expliquer par le fait que les GAM, ajustent mieux les courbes de réponse des variables prédictives. Ils sont mieux adaptés à la modélisation d'une région bien précise, mais dès qu'il s'agit d'une généralisation les GLM sont plus appropriés. (2) l'évaluation des modèles par une approche sur le terrain en relevant les présences/absences des espèces dans une petite zone de la région d'étude. Sur les huit espèces modélisées, seuls trois modèles ne correspondent pas aux observations de terrain. (3) des scénarios de changements climatiques sont effectués en modifiant les couches des prédicteurs concernés à savoir la température et les précipitations, grâce aux simulations pour les années 2071 à 2100 fournies par le département de géosciences de l'université de Fribourg. De manière générale, on observe une disparition ou un *statu quo* de la distribution des espèces. Pour trois espèces, une nouvelle aire de distribution pourrait être observée. Les scénarios de changement climatique apportent donc des résultats très inquiétants. Le paysage que l'on connaît actuellement risque de subir de forte modification d'ici la fin du siècle. Ce type d'étude peut contribuer à la prise de conscience des dangers du réchauffement climatiques sur notre environnement.

3 INTRODUCTION

En écologie végétale, les relations entre les plantes et leur environnement sont très vite remarquées. Au début du XIX^e siècle, Alexander von Humboldt et Aimé de Bonpland ainsi que Pyramus De Candolle observent déjà leurs relations avec le climat. Par la suite, de nombreuses recherches paraissent dans le but d'expliquer la distribution globale des plantes au moyen de facteurs environnementaux. L'arrivée de l'outil informatique et donc de logiciels puissants de systèmes d'informations géographiques (SIG) et de statistiques, notamment de l'utilisation courante des GLM et GAM (Guisan *et al.*, 2002) a permis le développement de différents modèles prédictifs de distribution d'habitat d'espèces végétales et/ou animales. Les implications de tels modèles peuvent entre autres servir à tester des hypothèses biogéographiques, à créer des atlas, à gérer des espèces rares et menacées ainsi que les éventuels impacts des changements climatiques sur la distribution des plantes (Guisan & Zimmermann, 2000).

3.1 PREUVES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET CONSÉQUENCES POUR LES PLANTES

Ces dernières années, l'augmentation, sous l'influence de l'homme, de la concentration des gaz à effet de serres au niveau mondial, a permis aux communautés à la fois politiques et scientifiques de s'interroger des conséquences de celle-ci (Houghton, 2001). Il a été observé que le climat a subi une augmentation de $0.61 \pm 0.16^{\circ}\text{C}$ entre 1861 et 2000 (Folland *et al.*, 2001), un taux d'augmentation du CO_2 100 fois plus rapide que ces 20'000 dernières années (Berger, 2002), ainsi qu'un allongement de la longueur des jours (Viron *et al.*, 2002). On peut noter quatre types de conséquence de ces changements climatiques sur les espèces végétales (Hughes, 2000) (Figure 1). 1° Un effet sur la phénologie dû à l'allongement de la saison de croissance favorable aux plantes conduisant à une floraison avancée (Menzel & Fabian, 1999 ; Walther *et al.*, 2002 ; Sparks et Menzel, 2002 ; Minorsky, 2002 ; Fitter & Fitter, 2002) ; 2° un effet sur la physiologie des végétaux comme la respiration, la photosynthèse ou encore la croissance (Phillips et Gentry, 1994 ; Cannell *et al.*, 1998) ; 3° des phénomènes d'adaptation (Rodriguez-Trelles et Rodriguez, 1998 ; Ettersson et Shaw, 2001) ; 4° un effet sur la distribution des espèces comme la migration vers les pôles et/ou les sommets (Parmesan, 1996; Shugart *et al.*, 2001 ; Klanderud et Birks, 2003).

Ces effets conduisent à de nouvelles interactions entre espèces comme la compétition et le parasitisme. En effet, de nouveaux contacts avec des espèces qui étaient absentes auparavant peuvent apparaître. Ces nouvelles interactions peuvent conduire à des extinctions ou des déplacements d'aire de distribution de certaines espèces menant à des compositions et structures de communautés différentes de celles que l'on connaît actuellement.

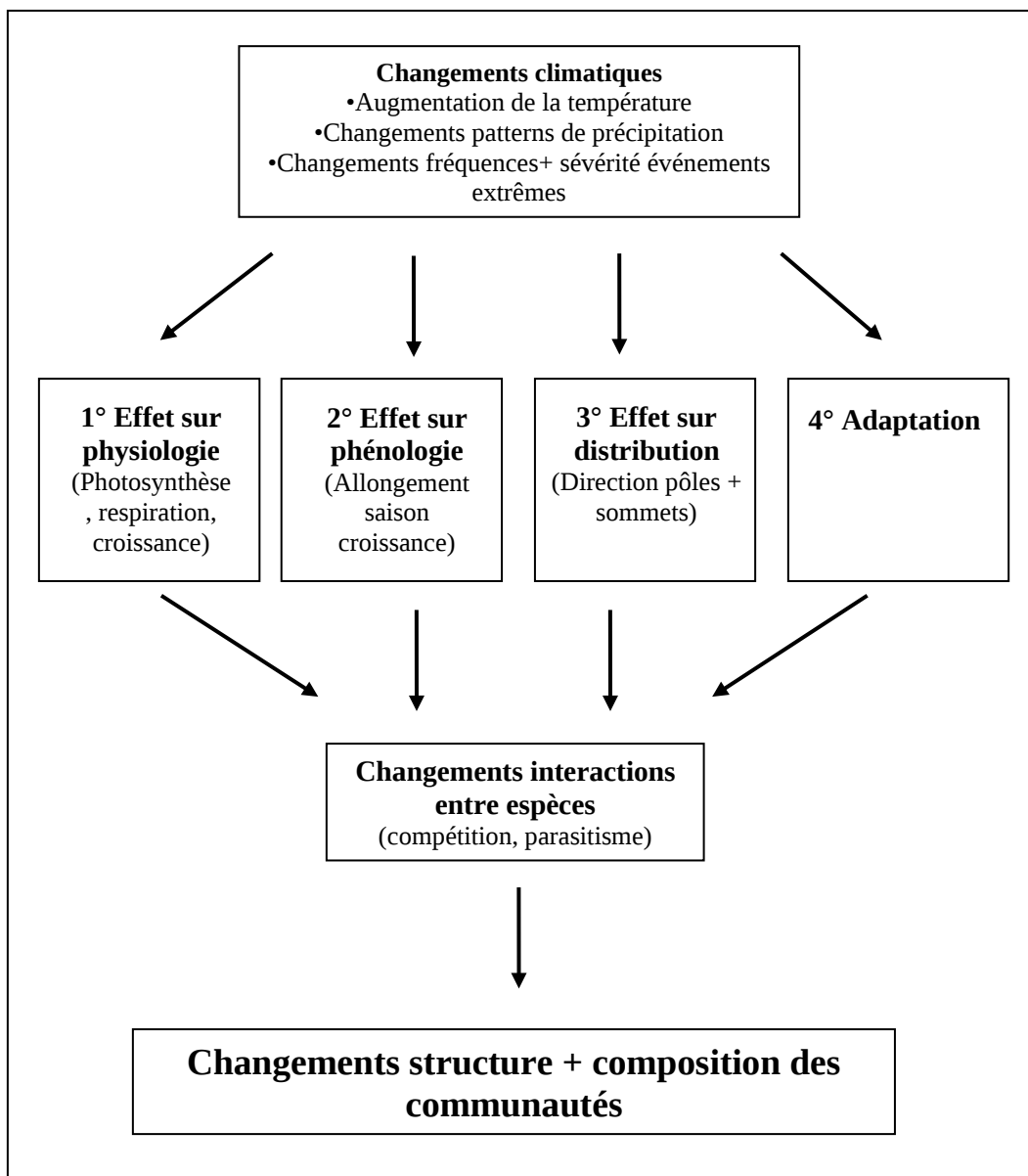


Figure 1 : Schéma récapitulatif des conséquences possibles des changements climatiques futurs. Modifié d'après Hugues, 2000.

Finalement, on remarque que les changements climatiques ont un impact sur la distribution géographique des espèces végétales à un niveau aussi bien mondial que régional comme l'Europe (Bakkenes *et al.*, 2002) ou les Alpes (Guisan et Theurillat, 2000 ; Theurillat et Guisan, 2001 ; Dirnböck *et al.*, 2003).

3.2 QU'EN EST-IL DE LA SUISSE ?

D'après Rebetez (2002), l'augmentation de 0.6°C pour l'ensemble du globe durant le XX^e siècle n'est pas linéaire et s'est produit en deux phases dont la première concerne la période 1910-1945. La seconde commence à partir de 1975 et s'étend jusqu'à nos jours. La cause principale en est l'émission de gaz à effet de serre. La Suisse se situe dans une région qui s'est réchauffée plus que la moyenne. Rebetez (2002), montre également que les températures ont augmenté de plus de 1.5°C au cours du XX^e siècle, aussi bien en plaine qu'en altitude alors que les précipitations annuelles moyennes n'ont pas subi de modifications nettes. On observe toutefois des changements significatifs au niveau des extrêmes ; il devient de moins en moins rare d'observer de très fortes précipitations suivies de grandes sécheresses. En ce qui concerne les précipitations neigeuses, on observe une diminution de l'enneigement dans les régions de basses et moyennes altitude alors qu'à haute altitude ce dernier n'a pas changé durant le siècle. La Suisse étant un pays montagnard, les principales conséquences des changements climatiques vont porter sur le recul des glaciers voire à la disparition des plus petits ce qui aura pour conséquence une fragilisation des sols. Le manque de neige qui constitue à elle seule une part non négligeable du revenu du pays grâce aux sports d'hiver, ainsi que la fonte du pergélisol, une augmentation de la fréquence des crues et inondations, sont autant de conséquences fâcheuses imputables au réchauffement climatique (Rebetez, 2002). Il s'agit donc pour la Suisse ainsi qu'aux autres pays de tout mettre en oeuvre afin de prévenir ou éviter ces catastrophes à l'avenir.

3.3 FACTEURS BIOTIQUES ET ABIOTIQUES

La distribution des plantes des étages subalpins et alpins est très intéressante. Durant le XX^e siècle, un décalage des espèces végétales vers les sommets (*i.e.* le long de gradients altitudinaux) s'est observé tout comme le déplacement de la limite altitudinale de la forêt (Hugues, 2000). Dans les Alpes, une augmentation de la température de 3 à 4°C peut conduire à la disparition d'espèces dont le potentiel de migration est faible et/ou ne trouvant pas les conditions climatiques favorables à leur établissement comme le besoin d'une longue durée de couverture neigeuse (Rebetez, 2002). Les montagnes étant généralement de forme conique, la migration d'espèces en altitude peut avoir comme conséquence une perte de diversité due à une diminution des surfaces

disponibles vers les sommets (Guisan et Theurillat, 2001). Brown *et al.* (1996), indiquent qu'en ce qui concerne les gradients altitudinaux, les facteurs abiotiques ne permettent pas à eux seuls d'expliquer les limites d'aires des espèces. La limite d'aire inférieure dépend principalement des interactions biotiques comme la compétition interspécifique. Certaines espèces sont susceptibles de disparaître en raison de l'arrivée d'autres espèces situées auparavant à plus basse altitude (Brown *et al.*, 1996).

3.4 CADRE ET BUT DE L'ÉTUDE

Dans le cadre des changements climatiques, il est intéressant de modéliser la distribution d'espèces structurantes qui peuvent avoir un impact majeur sur la structure du paysage dans les années à venir, ainsi que des espèces susceptibles d'entrer en compétition le long de gradients altitudinaux. Cette étude portera donc sur huit espèces de milieux ouverts des étages subalpins à alpins situés dans les Préalpes vaudoises. Huit espèces sont considérées dans cette étude qui s'intègre dans le projet MODIPLANT. Il s'agit de deux espèces de Cypéracées, *Carex flacca* et *Carex sempervirens*, quatre espèces de Poacées, *Cynosurus cristatus*, *Poa alpina*, *Bromus erectus* et *Brachypodium pinnatum*, ainsi que deux espèces de la famille des Plantaginacées, *Plantago media* et *Plantago alpina*.

Ce travail se divise en trois étapes. Dans un premier temps, des cartes de distributions potentielles de l'habitat de ces huit espèces à l'heure actuelle est effectuée au moyen de deux méthodes statistiques, à savoir les GLM (Generalized linear model) et les GAM (General additive model). Dans un deuxième temps, les distributions obtenues par les modèles sont comparées aux distributions réelles de ces espèces par une approche sur le terrain. Finalement, les paramètres susceptibles d'être modifiés par les changements climatiques dans les années à venir sont modifiés dans le but d'obtenir des cartes de distribution potentielle future.

4 MATERIEL ET MÉTHODES

4.1 SITE D'ÉTUDE

La région d'étude recouvre la zone des Préalpes vaudoises, partant de la pointe Sud-Est du Lac Léman et suivant le contour de la frontière du canton de Vaud (Figure 2). Toutes les zones en dessous de 800 m ainsi que toutes les zones de forêts, les pentes supérieures à 60° et les zones humides et anthropisées n'ont pas été prises en compte. Ainsi la zone d'étude recouvre un gradient altitudinal de 800 à 2700 m qui correspond au relevé le plus haut. Cela correspond à une surface totale de 193.89 km².

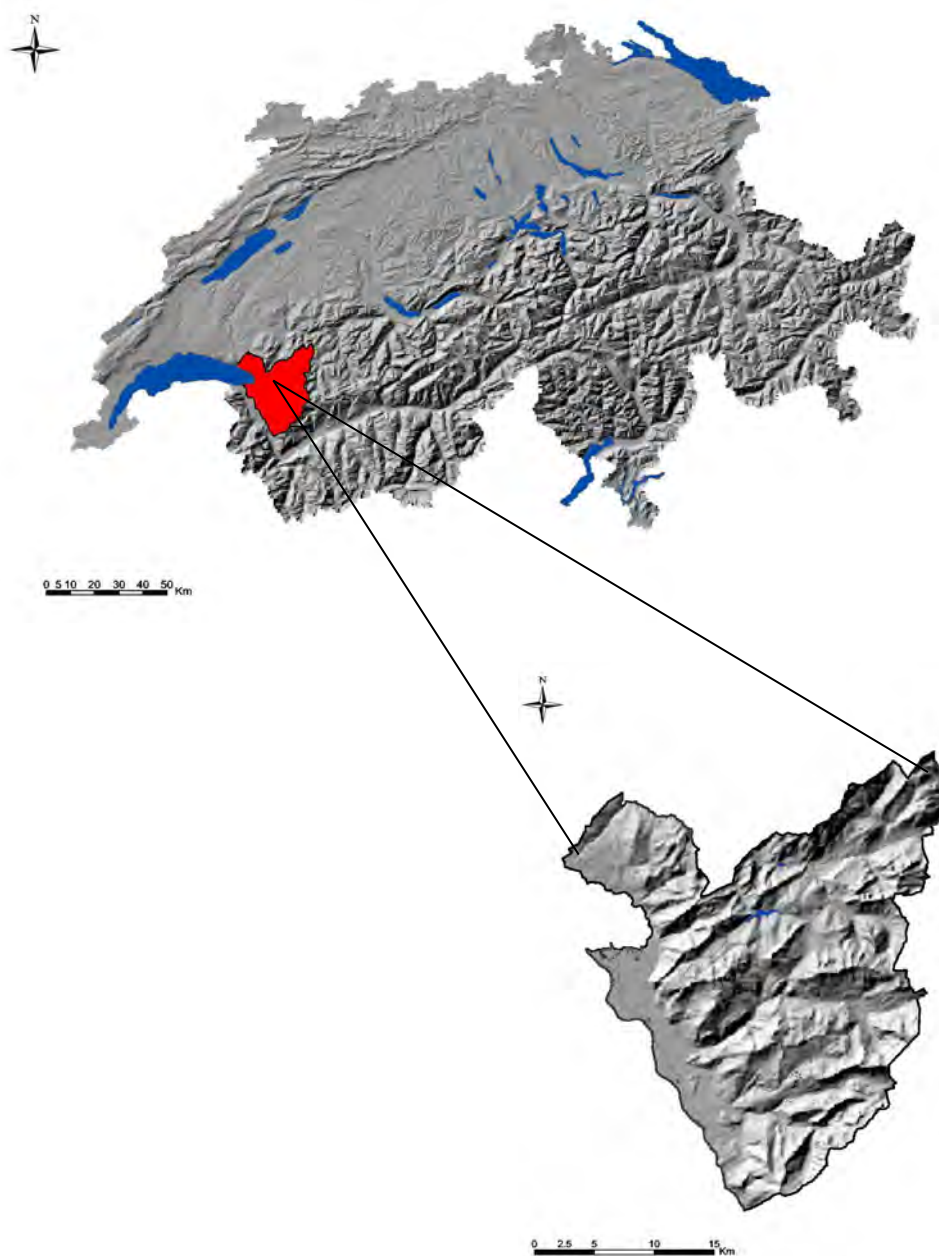


Figure 2: Le site d'étude. En haut la situation des Préalpes vaudoises dans la Suisse et en bas un agrandissement de la zone d'étude en particulier.

Cette région se caractérise par un climat global fortement influencé par les conditions météorologiques régnant sur l'Atlantique nord (MétéoSuisse). Cependant les montagnes créent un effet de barrière climatique. Il en résulte un gradient bien marqué ce qui permet de distinguer plusieurs domaines climatiques distincts. En effet les versants Nord des Préalpes sont plus sensibles aux conditions maritimes et donc bien alimentées en eau alors que les parties plus internes possèdent un microclimat plus sec dû à la protection par les versants avoisinants. D'autre part, la température et les précipitations dépendent très fortement de l'altitude. En effet on passe d'une moyenne annuelle de 8°C à 600 m à -5°C à 3000 m pour les températures et de 120 à 260 cm pour les précipitations. De plus la durée d'enneigement varie fortement d'une année à l'autre (Bouët, 1985). Il en va de même pour l'épaisseur de la couche neigeuse. Le plus faible enneigement, 2 cm en moyenne pour la saison, a été enregistré en 1990 à Château-d'Oex (1000m d'altitude) contre 55 cm en moyenne en 1963 (Rebetez 2002). Les sols sont essentiellement de type calcaire, mais il est aussi possible de trouver des Flysch (roche acide assez ancienne), des calcaires siliceux ainsi que des dépôts du quaternaire.

4.2 ESPÈCES ÉTUDIÉES

L'étude porte sur huit espèces herbacées des prés, pâturage et pelouse allant de l'étage collinéen à alpin. Ces dernières sont *Carex sempervirens* (carsem) et *Carex flacca* (carfla) de la famille des Cyperacées, *Bromus erectus* (broere) et *Brachypodium pinnatum* (brapin), *Cynosurus cristatus* (cyncri) et *Poa alpina* (poaalp) de la famille des Poacées et *Plantago media* (plamed) et *Plantago alpina* (plaalp) de la famille des Plantaginacées. *C. flacca*, *B. erectus*, *C. cristatus* et *P. media* sont des espèces plutôt collinéenne à montagnarde (Aeschiman et Burdet, 1994) alors que *C. sempervirens*, *B. pinnatum*, *Poa alpina* et *Plantago alpina* sont subalpines à alpines (Tableau 1).

Tableau 1 : Espèces considérées dans l'étude en rapport avec leur étage, milieu et type de sol respectifs.

Espèces	Famille	Etage	Milieu	Sol/substrat
<i>Brachypodium pinnatum</i>	Poacées	Coll.-subalp	<i>Cirsio-Brachypodium, Mésobromion</i>	calcaire, sec
<i>Bromus erectus</i>	Poacées	Coll.-mont.- (subalp)	<i>Mésobromion, Xérobromion</i>	calcaire, peu profond, sec
<i>Carex flacca</i>	Cyperacées	Coll.-subalp.- (alp)	<i>Mollinion</i>	calcaire, pauvre
<i>Carex sempervirens</i>	Cyperacées	(mont).- subalp.-alp	<i>Seslerion, Caricion firmae</i>	sec et pierreux
<i>Cynosurus cristatus</i>	Poacées	Coll.-subalp	<i>Cynosurion</i>	fertile
<i>Poa alpina</i>	Poacées	(Coll.-mont).- subalp.-alp	<i>Poion alpinae</i>	fertile
<i>Plantago media</i>	Plantaginacées	Coll.-mont.- (subalp)	<i>Mésobromion</i>	calcaire, pauvre en azote
<i>Plantago alpina</i>	Plantaginacées	subalp.-alp	<i>Nardion, Poion alpinae</i>	acide en surface

Coll.=collinéen, mont.=montagnard, subalp.=subalpin, alp.=alpin

La plupart de ces espèces sont structurantes, représentatives de milieux typiques de leur étage ayant des affinités variées pour le substrat. *C. cristatus* est caractéristique du *Cynosurion* (pâturage de basse et moyenne altitude)) et est remplacé en altitude (à partir de l'étage montagnard supérieur) par le *Poion alpinae* caractérisé par *P. alpina*. *B. erectus* est caractéristique du *Mésobromion* tout comme *B. pinnatum* et *P. media*, ainsi que le *Xérobromion*. *B. pinnatum* caractérise le *Cirsio-Brachypodium*, *C. flacca* le *Mollinion*, *C. sempervirens* le *Seslerion* et *P. alpina* le *Nardion* et le *Poion alpinae* (Delarze et al., 1998).

B. erectus, *B. pinnatum*, *P. media* et *C. flacca* ont une préférence pour les sols de types calcaires, alors que *P. alpina* et *C. sempervirens* sont plutôt indifférentes au type de substrat. *C. cristatus* et *P. alpina* se trouvent sur des sols fertiles et plutôt bien alimentés en eau.

4.3 ECHANTILLONNAGE

Durant l'été 2002, lors du projet MODIPLANT, 212 points de relevés de présence/absence des espèces étudiées sont obtenus selon un échantillonnage aléatoire stratifié (EAS) dans des carrés de 8*8 m. La stratification a été faite en fonction de l'altitude, la pente, l'exposition et la perméabilité des sols.

4.4 DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

Les données environnementales sont dérivées à partir de données climatiques ou du modèle numérique de terrain. Toutes les couches ont une résolution de 25m. Au cours de cette étude, huit prédicteurs ont été retenus. Les moyennes annuelles de températures (taveyy) et de précipitations (precyy) ont été utilisées plutôt que les moyennes mensuelles. A partir des valeurs de températures le nombre de jour de gel durant la saison de croissance (sfroyy) (étant définie comme le nombre de jours où la température est supérieure ou égale à 3 °C) a été obtenu. A partir du modèle numérique de terrain (mnt) différentes caractéristiques de la topographie ont pu être calculées tels que la position topographique (concavité et/ou convexité) avec fenêtre focale de 100m de rayon (topo100), les radiations solaires annuelles globales (sradyy), la pente (slp25) et l'exposition (aspectsin et aspectcos) (Tableau 2).

Tableau 2 : Tableau des prédictors utilisés dans l'étude avec leurs abréviations et unités.

Prédicteurs	Abréviation	Unités	Valeurs minimales	Valeurs maximales
Températures moyennes annuelles	taveyy	1 / 100 °C	-232	800
Précipitations moyennes annuelles	precyy	1 / 10 mm / an	13184	21739
Radiations solaires globales annuelles	sradyy	kJ / jour / an	59783	277412
Nombre de jour de gel durant la saison de croissance	sfroyy	Nombre de jours *100	0	628
Sinus de l'exposition	aspectsin	Aucune	-0.99998	1
Cosinus de l'exposition	aspectcos	Aucune	-0.99997	0.999924
Topographie	topo100	Aucune	-64.0408	40.59184
Pente	slp25	Angle en °	1	60

4.5 ANALYSES STATISTIQUES

4.5.1 GLM stepwise exploratoire

Dans un but comparatif deux types d'analyses sont utilisés dans cette étude pour modéliser la distribution de chacune des espèces étudiées. Les GAM sont effectués au moyen du module GRASP (Lehmann *et al.*, 2002) dans S-plus (Insightful corp.) et les GLM directement dans S-plus. Pour commencer, des GLM stepwise à famille binomiale et test de Chi sont effectués dans un but exploratoire. La température moyenne annuelle (taveyy), considérée comme la variable explicative la plus proximale, est introduite en premier dans la stepwise. Puis, dans un ordre de proximalité, elle est suivie par les radiations solaires annuelles (sradyy), les précipitations (precyy), le nombre de jours de gel (sfroyy), l'exposition (aspectsin et aspectcos), la topographie (topo100) et la pente (slp25). Des permutations sur les quatre derniers prédictors ont été effectuées tout en laissant les quatre premiers en première place et dans le même ordre. Chaque prédicteur est accompagné de sa fonction quadratique. La paire prédicteur et son carré sont toujours laissés ensemble dans le même ordre lors des permutations. Ensuite, le modèle de chacune des espèces possédant l'ordre permettant d'expliquer le plus de déviance est conservé. Si des modèles différents permettent d'expliquer la même déviance, celui

respectant le mieux l'ordre de proximalité des prédicteurs a été conservé. Les prédicteurs introduits dans GRASP sont entrés dans l'ordre du modèle expliquant le plus de déviance pour chaque espèce, à la différence que leurs fonctions quadratiques n'ont pas besoin d'être incluses.

4.5.2 GLM

Pour les GLM, la déviance expliquée par le modèle (D2) ainsi que l'adjD2, qui pondère le D2 par le nombre d'observations et le nombre de termes dans le modèle, ont été calculées. La réduction de déviance du modèle pour chacun des prédicteurs est testée au moyen d'une analyse de variance au moyen d'un test de Chi. L'évaluation du modèle se fait par l'approche graphique ROC' (coefficient de Gini compris entre 0 et 1). Pour les prédictions spatiales, les valeurs de l'intercepte et des coefficients des prédicteurs sont introduits dans la formule 1 qui est ensuite utilisées dans ESRI® Arc GIS 8.2 pour créer les cartes de distributions.

$$p(y) = \frac{1}{(1 + \exp(-(\text{intercepte} + (\text{coef.} * \text{prédicteur}))))} \quad (\text{formule 1})$$

4.5.3 GAM

Dans GRASP, la modélisation des présences/absences des espèces étudiées s'effectue au moyen de modèles GAM à familles binomiales et lien « logit ». Les prédicteurs significatifs ont été sélectionné par une procédure stepwise, avec test de Chi à seuil limite de 0.05, sur l'ordre retenu par le GLM stepwise. Tous les modèles sont ajustés avec des prédicteurs lissés à quatre degrés de liberté. A partir des contributions de chacun des prédicteurs lors de modèle univarié et de la déviance expliquée totale du modèle (D2) la proportion de déviance expliquée par chaque prédicteurs est obtenue en calculant le rapport de la contribution du prédicteurs sur D2. L'évaluation des prédictions se fait par la méthode graphique ROC simple, c'est-à-dire entre les prédictions et les observations, ainsi que par cross-validation (cvROC) avec subdivision en cinq groupes.

Dans ce cas, les valeurs des ROC sont comprises entre 0.5 et 1, car le coefficient de Gini n'a pas été effectué. Pour les prédictions spatiales, les modèles sont exportés au moyen d'une table et les prédictions sont faites dans ArcView GIS 3.2a.

4.5.4 Comparaison GLM/GAM

Afin de comparer les deux types d'analyses, la proportion des prédicteurs retenus par les GAM par rapport aux GLM a été calculée. Elle représente le nombre de prédicteurs retenus par les GAM et apportant une réduction de déviance significative sur la quantité de ceux-ci étant aussi présents dans les GLM.

4.5.5 Changements climatiques

En ce qui concerne les changements climatiques, les couches SIG de températures et de précipitations sont modifiées à partir des simulations fournies par le département de géosciences de l'université de Fribourg (Beniston, com. Pers) (Annexe 1). Pour effectuer ces simulations, l'auteur s'est basé sur un point à 1000m d'altitude dans les Préalpes vaudoises. Les valeurs minimales et maximales des couches SIG de ces prédicteurs sont modifiées dans le fichier adéquat de GRASP. Les modèles obtenus précédemment sont alors rappliqués et les nouvelles cartes potentielles de distribution sont construites comme précédemment. De plus, une combinaison des cartes de distribution actuelle et future est faite de manière à repérer les zones où les espèces sont toujours soit présentes ou absentes, les pertes d'habitat (disparition) ainsi que les gains (apparition).

4.5.6 Evaluation par approche sur le terrain

Pour les huit espèces, les cartes de probabilités de présences des espèces obtenues par GRASP sont reclassifiées en trois classes égales (Cl1 = 0-33.33%, Cl2 = 33.33-66.66% et Cl3 = 66.66-100%). Une zone d'échantillonnage a été retenue à savoir la commune de Bex (Annexe 2). Après l'avoir filtrée, c'est-à-dire après avoir éliminé les villages, les routes et chemins de fer et les forêts, cinq points par classe et par espèces ont été tirés aléatoirement. Pour chaque point, un relevé partant du centre et se dirigeant de 5m en direction des points cardinaux est effectué. La présence ou l'absence des huit espèces est relevée. Des tests exacts de Fisher ont été effectués, car les tables de contingences pour chacune des espèces contiennent au moins une case à nombre d'observation inférieure à cinq (Scherrer, 1984) dans le but de tester si les prédictions du modèle correspondent aux observations réelles.

5 RÉSULTATS

5.1 GLM

Les GLM stepwise permettant d'obtenir les meilleurs pourcentages de déviance expliquée sont ceux dont l'ordre d'entrée des prédicteurs sont les suivants : pour *B. pinnatum*, *B. erectus*, *C. flacca*, *C. cristatus* et *Plantago alpina* il s'agit de taveyy, sradyy, precyy, sfroyy, aspectsin, aspectcos, topo100 et slp25. En ce qui concerne *C. sempervirens* on obtient taveyy, sradyy, precyy, sfroyy, aspectsin, aspectcos, slp25, topo100, ainsi que taveyy, sradyy, precyy, sfroyy, aspectsin, slp25, aspectcos, topo100 et taveyy, sradyy, precyy, sfroyy, aspectcos, topo100, aspectsin slp25 pour *P. media* et *Poa alpina* respectivement.

Les modèles obtenus pour les huit espèces expliquent entre 15% et 52 % de déviance. Les espèces de basse altitude offrent généralement de meilleurs modèles, au vu de la variance expliquée, que celles d'altitude. En effet des espèces de plaine ou moyenne altitude comme *P. media*, *B. erectus*, *B. pinnatum* et *C. cristatus* ont respectivement 52.3%, 41.8%, 45.0% et 48.3 % de variance expliquée alors que les valeurs les plus faibles se retrouvent chez *P. alpina*, *C. flacca*, *C. sempervirens*, et *Poa alpina*, respectivement 21.7%, 28.8%, 20.22%, 15.4 %, qui sont généralement situées dans des altitudes supérieures (Tableau 3).

Tableau 3 : Tableau des pourcentages de déviance expliquée (D2 et adjD2), du nombre de degrés de libertés (dl) et de la mesure d'évaluation du modèle (ROC' compris entre 0 et 1) pour chacune des espèces.

Espèces	D2(%)	adjD2 (%)	dl	ROC'
<i>Brachypodium pinnatum</i>	47	45	212	0.88
<i>Bromus erectus</i>	43	42	212	0.86
<i>Carex flacca</i>	31	29	212	0.72
<i>Carex sempervirens</i>	22	20	212	0.58
<i>Cynosurus cristatus</i>	50	48	212	0.86
<i>Poa alpina</i>	20	15	212	0.57
<i>Plantago media</i>	54	52	212	0.90
<i>Plantago alpina</i>	24	22	212	0.63

Le même schéma se présente pour les tests d'évaluations (ROC'). En effet les ROC' les plus élevées se rencontrent chez des espèces tels que *P. media*, *B. pinnatum*, *B. erectus*, *C. cristatus* et *C. flacca* alors qu'elles sont nettement inférieures chez *Plantago alpina*, *C. sempervirens* et *Poa alpina*.

Les variables significatives les plus fréquemment retenues par les GLM stepwise sont la pente et la température alors que les expositions (sinus et cosinus) et la topographie sont celles qui sont le moins souvent conservées (Tableau 4). En effet la pente est conservée dans sept modèles sur huit, la température dans six, les précipitations et les jours de gels dans trois, dans quatre pour les radiations solaires, et la topographie, le sinus et le cosinus de l'exposition dans un ou deux. Pour tous les prédictors retenus dans chacun des modèles, le nombre de degré de liberté, la valeur du test de t, sa p-value et la p-value du test de Chi sont obtenus (Annexe3).

Tableau 4: Prédictors retenus par les GLM stepwise pour chaque espèce.

Espèces	Prédictors retenus par les GLM stepwise
<i>Brachypodium pinnatum</i>	Sradyy ** / sfroyy ** / sfroyysq / aspectsinsq / aspectcos ** / slp25 ° / slp25sq **
<i>Bromus erectus</i>	taveyysq ** / sradyy * / precyy / precyysq * / topo °
<i>Carex flacca</i>	sradyysq ** / precyy ** / precyysq ** / sfroyy / sfroyysq / slp25 **
<i>Carex sempervirens</i>	taveyysq ** / precyy ** / precyysq / slp25sq ** / topo100 **
<i>Plantago media</i>	taveyy ** / taveyysq ** / precyysq ° / sfroyy ** / slp25 / slp25sq ** / aspectcos*
<i>Plantago alpina</i>	taveyy / taveyysq ** / precyy / aspectsin ** / topo100 ** / slp25sq **
<i>Cynosurus cristatus</i>	taveyy ** / taveyysq / sradyy ** / sfroyy * / slp25 / slp25sq *
<i>Poa alpina</i>	taveyy ** / taveyysq * / sradyy / sradyysq * / sfroyy ° / aspectcossq / topo100 ° / topo100sq / aspectsin / aspectsinsq / slp25 / slp25sq **

** hautement significatif, *significatif, ° marginalement significatif.

De tous les modèles obtenus par les GLM celui de *Poa alpina* est le moins bon (Tableau 3). En effet bien que celui-ci, lors de la stepwise, a retenu une grande quantité de prédictors, seulement quatre contribuent significativement à réduire la déviance, à savoir taveyy ($p < 0.0001$) et son carré ($p=0.015$), le carré de sradyy ($p=0.015$) et de alp25 ($p=0.005$). D'autres variables, comme sfroyy ($p=0.055$) et topo100 ($p=0.086$) sont marginalement significatives, ce qui nous indique une tendance. Les autres modèles ont gardé moins de prédictors par la stepwise, et de ces derniers seul un ou deux ne sont pas significatifs. *B. pinnatum* a conservé sradyy ($p=0.0062$), sfroyy ($p<0.0001$), aspectcos (0.001) et le carré de slp25 ($p=0.0082$) comme variable significatives, alors que pour *B. erectus* c'est le carré de taveyy ($p<0.0001$), sradyy ($p=0.018$) et precyy au carré ($p=0.03$). En ce qui concerne *C. sempervirens* le carré de taveyy ($p<0.0001$), de slp25 ($p=0.001$), de precyy ($p<0.0001$), et de topo100 ($p<0.0001$) sont hautement significatifs alors que pour *C. flacca* ce sont les carrés de sradyy ($p<0.0001$), et de precyy ($p<0.0001$), ainsi que precyy ($p=0.0004$) et slp25 ($p=0.0009$). Le modèle de *P. media* retient comme prédictors taveyy ($p<0.0001$), et son carré ($p<0.0001$), sfroyy ($p=0.0013$), slp25 au carré ($p=0.0022$) ainsi que aspectcos ($p=0.022$) et pour *P. alpina* il s'agit des carrés de precyy ($p<0.0001$) et de slp25 ($p<0.0001$), topo100 ($p=0.001$) et aspectcos ($p=0.002$). *C. cristatus* a conservé taveyy ($p<0.0001$), sradyy ($p<0.0001$), sfroyy ($p=0.0404$) et le carré de slp25 ($p=0.0238$). L'annexe 4 représente les cartes de distribution potentielles de l'habitat de chacune des huit espèces pour les modèles des GLM. De manière générale les prédictions spatiales sont cohérentes avec l'écologie des espèces. Après observation de ces cartes, les optima écologiques des espèces semblent respectés.

5.2 GAM

En ce qui concerne les GAM, l'ordre d'entrée des prédicteurs pour chaque espèce est celui du modèle retenu par les GLM. Les modèles obtenus expliquent entre 18% et 65% de déviance. Comme pour les GLM, on remarque que les espèces de basse altitude ont en général un meilleur pourcentage de déviance expliquée par rapport à celles d'altitude plus élevée. En effet, les modèles basés sur les présences/absences de *Carex sempervirens*, *Poa alpina* et *Plantago alpina* expliquent respectivement 26%, 18% et 24% de déviance alors que pour les autres modèles, au moins 41% de déviance est expliquée comme c'est le cas pour *Bromus erectus*. Un pourcentage de déviance de 44%, 48%, 61% et 65% est expliqué pour *C. flacca*, *B. pinnatum*, *Plantago media* et *C. cristatus* (Tableau 5).

Tableau 5: Tableau des pourcentages de déviance expliquée par le modèle (D2), du nombre de degrés de liberté (dl), ainsi que de deux types de mesures d'évaluation à savoir l'approche graphique ROC (valeur entre 0.5 et 1) dans le cas de validations simples (ROC) et croisées (cvROC).

Espèce	D2 (%)	dl	ROC	cvROC
<i>Brachypodium pinnatum</i>	48	212	0.94	0.84
<i>Bromus erectus</i>	41	212	0.92	0.81
<i>Carex flacca</i>	44	212	0.92	0.83
<i>Carex sempervirens</i>	26	212	0.83	0.76
<i>Cynosurus cristatus</i>	65	212	0.98	0.91
<i>Poa alpina</i>	18	212	0.76	0.72
<i>Plantago media</i>	61	212	0.97	0.93
<i>Plantago alpina</i>	24	212	0.82	0.73

Comme précédemment, les modèles basés sur les espèces d'altitude fournissent des valeurs ROC plus faibles que les autres. *Carex sempervirens*, *Poa alpina* et *Plantago alpina* ont des valeurs ROC de 0.83, 0.76 et 0.82 et de cvROC de 0.76, 0.72, et 0.73 respectivement. Les cinq autres espèces ont des valeurs de ROC comprises entre 0.92 et 0.98 et entre 0.81 et 0.93 pour les cvROC (Tableau 5).

Le tableau 6 montre les prédictors retenus par les GAM stepwise. sfroyy et taveyy sont retenus et apportent une réduction de déviance significative dans la moitié des modèles, alors que precyy et la slp25 ne le sont que pour deux. En ce qui concerne les quatre derniers prédictors, seul topo100 apporte une réduction de déviance significative dans un modèle. Les trois autres prédictors ne sont jamais retenus. Pour tous les prédictors retenus dans chacun des modèles, le pourcentage de déviance expliquée, la valeur du test de Chi et sa p-value sont obtenus (Annexe 5). Le modèle de *B. pinnatum* est celui à prendre avec le plus de précaution étant donné qu'aucun des prédictors retenus ne réduit significativement la déviance du modèle. En ce qui concerne les autres prédictors, taveyy apporte une réduction de déviance dans tous les modèles qui l'ont retenu (Chisq = 10.87, p = 0.01 ; Chisq = 12.17, p = 0.005 ; Chisq = 10.20, p = 0.02 ; Chisq = 16.05, p < 0.001, pour *Carex flacca*, *Poa alpina*, *Plantago media* et *Plantago alpina* respectivement). Les précipitations réduisent significativement la déviance dans les deux modèles où elles sont retenues (Chisq = 12.64, p = 0.005 ; Chisq = 10.16 ; p = 0.01, pour *C. sempervirens* et *C. cristatus* respectivement). *B. erectus*, *C. sempervirens*, *C. cristatus* et *P. media* sont des modèles dont sfroyy réduit significativement de la déviance (Chisq = 6.13, p = 0.048 ; Chisq = 15.86, p = 0.001 ; Chisq = 21.66, p < 0.001 ; Chisq = 10.06, p = 0.01). Finalement, topo100 réduit également de la déviance dans le modèle de *C. flacca* (Chisq = 10.31, p = 0.01).

Tableau 6 : Prédictors par les GAM stepwise pour chacune des huit espèces.

Espèce	Prédictors retenus par les stepwise
<i>Brachypodium pinnatum</i>	sfroyy / aspectcos / slp25
<i>Bromus erectus</i>	sfroyy* / slp25
<i>Carex flacca</i>	taveyy** / sfroyy / aspectcos / topo100** / slp25
<i>Carex sempervirens</i>	precyy** / sfroyy** / slp25 / topo100
<i>Cynosurus cristatus</i>	srady / precyy** / sfroyy** / slp25*
<i>Poa alpina</i>	Taveyy** / slp25**
<i>Plantago media</i>	Taveyy* / sfroyy** / slp25 / aspectcos
<i>Plantago alpina</i>	Taveyy** / topo100 / slp25

** hautement significatif, *significatif.

Le graphique des courbes de réponse des prédictors dont la réduction de déviance est significative et ayant retenus par les stepwise est représenté dans l'annexe 6. L'annexe 7 présente les cartes potentielles de distribution des huit espèces ainsi que leur carte d'erreur associée. On remarque que les distributions correspondent bien aux optimum altitudinaux des ces espèces (Tableau 1).

5.3 COMPARAISON GLM/GAM

On peut noter que dans la plupart des cas, les prédictors retenus par les GAM ne sont pas les même que pour les GLM. Le tableau 7 présente la proportion de prédictors apportant une diminution de déviance significative retenue par les GAM par rapport aux GLM. On remarque que seul trois espèces sur huit n'ont aucun prédictors retenus en commun. Dans la majorité des modèles, au moins la moitié des prédictors conservés dans les GAM sont identique à ceux retenus par les GLM. En moyenne, les GLM retiennent 4.0 +/- 0.5 prédictors alors que les GAM n'en retiennent que 1.6 +/- 0.9.

Tableau 7: Proportion de prédictors ayant été retenus et apportant significativement une réduction de déviance par les GAM stepwise et également par les GLM.

Espèces	Proportion prédictors communs
<i>Brachypodium pinnatum</i>	0
<i>Bromus erectus</i>	0
<i>Carex flacca</i>	0
<i>Carex sempervirens</i>	0.5
<i>Cynosurus cristatus</i>	0.66
<i>Poa alpina</i>	1
<i>Plantago media</i>	1
<i>Plantago alpina</i>	1

5.4 EVALUATION PAR APPROCHE SUR LE TERRAIN

L'annexe 8 présente les présences/absences observées sur le terrain et prédites par le modèle pour les huit espèces ainsi que leurs tables de contingences (Annexe 9). *Carex sempervirens*, *Poa alpina* et *Plantago media* sont les trois espèces dont les observations sur le terrain sont significativement différentes des prédictions effectuées au moyen des GAM ($p = 0.003$; $p = 0.02$; $p = 0.03$ respectivement). Pour les cinq autres espèces, les observations de terrain et les prédictions obtenues par les GAM ne sont pas significativement différentes ($p = 0.12$; $p = 1$; $p = 1$; $p = 0.24$; $p = 0.06$, pour *B. pinnatum*, *B. erectus*, *C. flacca*, *C. cristatus* et *P. alpina* respectivement) (Tableau 8).

Tableau 8 : Tableau des p-value obtenues par le test de Fisher pour chaque espèce.

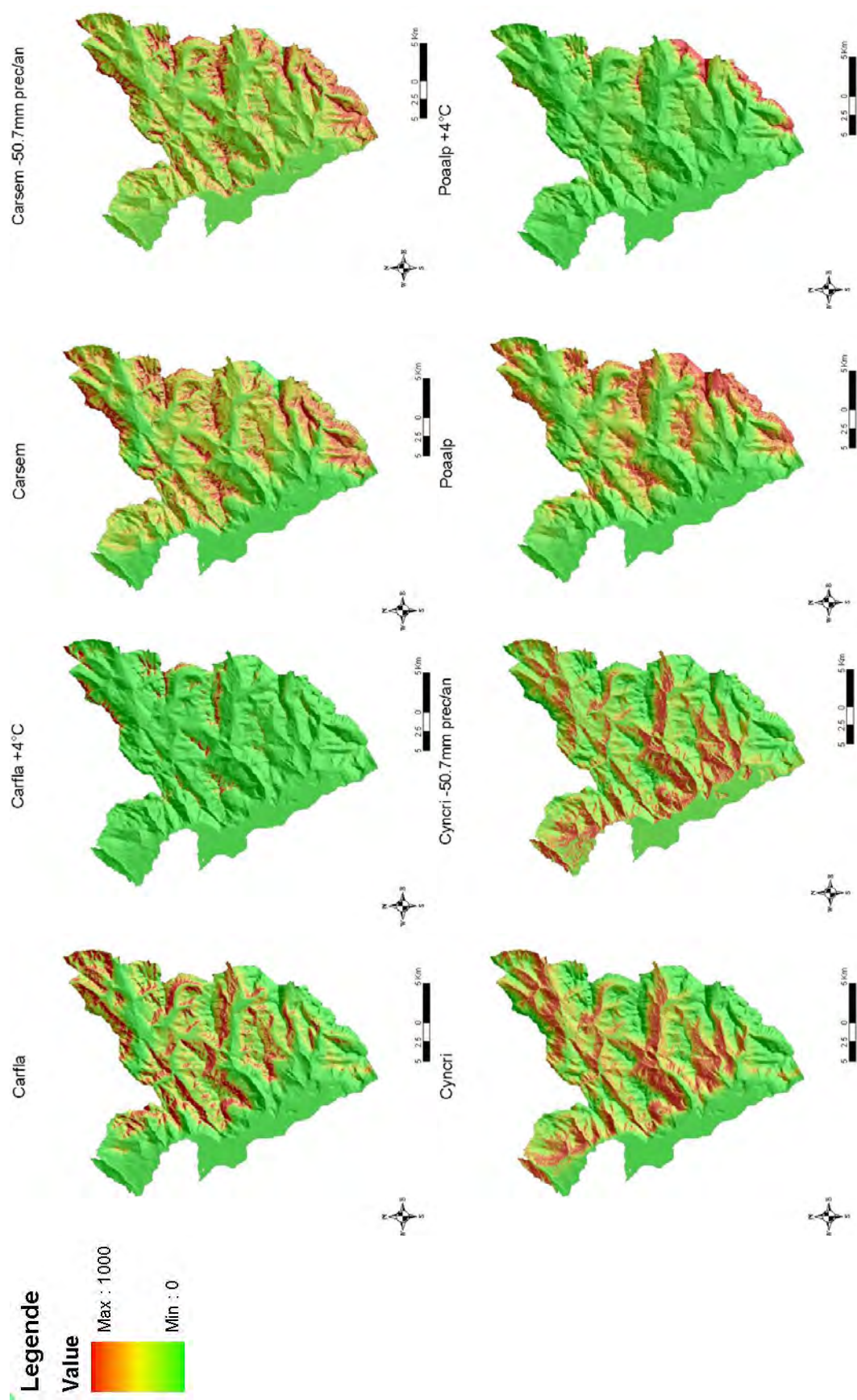
Espèces	p-value
<i>Brachypodium pinnatum</i>	0.12
<i>Bromus erectus</i>	1
<i>Carex flacca</i>	1
<i>Carex sempervirens</i>	0.003**
<i>Cynosurus cristatus</i>	0.24
<i>Poa alpina</i>	0.02*
<i>Plantago alpina</i>	0.06°
<i>Plantago media</i>	0.03*

** hautement significatif, *significatif, °marginalelement significatif.

5.5 SCÉNARIOS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Etant donné que seuls les prévisions des prédicteurs taveyy et precyy sont disponibles jusqu'à 2100, il n'a été possible de modifier que les modèles ayant retenu l'un ou l'autre de ces derniers. Les modèles concernant *Brachypodium pinnatum* et *Bromus erectus* ne sont donc pas ré-appliqués dans le cadre des changements climatiques. Les précipitations sont modifiées dans les modèles de *Carex sempervirens* et *Cynosurus cristatus*. Dans ce cas, une diminution de 50.7mm de pluie/an est attendue et est soustraite à la couche SIG de toute la région d'étude. Une augmentation de la température de l'ordre de 4°C est effectuée de la même manière pour *Carex flacca*, *Plantago alpina*, *Plantago media* et *Poa alpina*.

La figure 3 montre les cartes de distribution potentielles de ces six espèces dans les conditions actuelles et futures. Des espèces tels que *C. sempervirens* et *Plantago alpina* montrent un décalage de leur aire de distribution vers le sommet et une réduction de celle-ci dans les zones d'altitudes inférieures. Quant aux distributions de *Carex flacca*, *Plantago media* et *Poa alpina* il n'y a pas de réelle montée vers les plus hautes altitudes, dans le sens colonisation de nouveau terrain, mais une diminution des aires inférieures et une augmentation de la probabilité d'observer ces espèces dans des zones où celles-ci étaient déjà également faible avant changement. Ainsi *Poa alpina* se retrouve restreinte au sommet alors que *Plantago media* et *Carex flacca* sont limités dans l'ancienne zone marginale supérieure de leur distribution. *Cynosurus cristatus* décale son aire de distribution vers le bas. En effet, sa distribution après changement climatique se retrouve avec une plus grande probabilité dans les zones de plaines et particulièrement sur les versants Nord. L'annexe 10 montre plus précisément les zones de déclin et de colonisation des six espèces.



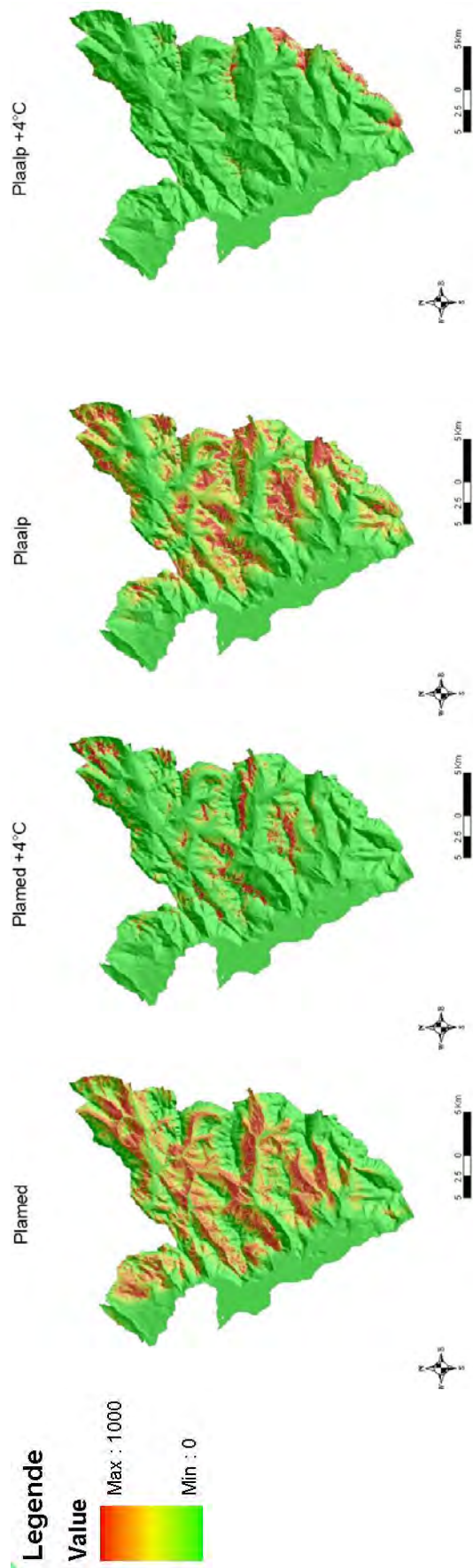


Figure 3: Cartes potentielles de distribution de l' habitat des six espèces d' après le jeu de données actuel (à droite) et dans les conditions des changements climatiques (à gauche). La légende représente la probabilité d' occurrence des espèces comprise entre 0 et 100 %.

6 DISCUSSION

Au cours de ces dernières décennies, l'importance croissante de l'outil informatique, autant en ce qui concerne les systèmes d'information géographique que des logiciels de statistiques, a contribué au développement de différents modèles prédictifs de distribution d'habitat d'espèces végétales et/ou animales (Bakkenes *et al.*, 2002 ; Guisan *et al.*, 2002) dans des buts de gestion d'espèces rares ou menacées (Brönimann, 2003) ou, comme pour ce travail, dans le cadre des changements climatiques (Guisan et Theurillat, 2000). Notre travail se divise en trois parties dont la première concerne la création de cartes potentielles prédictives de l'habitat de huit espèces des milieux ouverts dans la région des Préalpes vaudoises. Deux types d'analyses statistiques sont utilisés dans ce but, des GLM et des GAM, dont il est question de faire une comparaison. Dans un deuxième temps, une approche sur le terrain permet la vérification des cartes précédemment effectuées et finalement des scénarios de changements climatiques sont incorporés dans les modèles pour voir les variations entre les distributions présentes et futures.

Analyse statistique GLM/GAM

Ces dernières années ont été marquées par une grande avancée concernant l'application des analyses de régression, aussi bien à travers les modèles linéaires généralisés (GLM) que les modèles additifs généralisés (GAM). Au cours de cette étude, ces deux types d'analyses ont été utilisés sur un même jeu de données, il est donc intéressant d'en faire une comparaison. Lorsque l'on compare les cartes de distribution potentielle de l'habitat des huit espèces effectuées à partir des GLM et des GAM, on se rend compte qu'elles sont pratiquement identiques. Il s'avère donc que des combinaisons de prédicteurs différents peuvent donner la même carte potentielle. La seule vraie différence qu'il y a entre les deux types de cartes se trouve chez *B. erectus*. La carte effectuée avec les GLM prédit de fortes probabilités d'occurrence dans certaines zones de la plaine du Rhône. En ce qui concerne les prédicteurs retenus qui apportent une réduction significative de la déviance, le tableau 7 indique qu'il y a des différences. Les GLM retiennent de manière générale plus de prédicteurs que les GAM, même si l'on ne tient pas compte des termes simples et aux carrés implémentés dans les GLM. Dans trois cas sur huit, aucun des prédicteurs retenus par les deux types d'analyses ne sont identique.

Avec les GLM, tous les prédicteurs sont retenus au moins une fois dans les analyses soit par leurs termes simples soit quadratique, alors que pour les GAM, les prédicteurs les plus retenus sont sfroyy et taveyy suivis de precyy et slp25. En ce qui concerne les pourcentages de déviations expliqués par les deux approches, on remarque que pour toutes les espèces sauf pour *B. erectus*, les résultats des GAM sont meilleurs que les GLM. On obtient des modèles expliquant plus de déviance avec les GAM et que ces derniers utilisent moins de prédicteurs pour y parvenir. Cela peut s'expliquer par le fait que les GAM, au contraire des GLM, ajustent au maximum les courbes de réponse des variables prédictives. Cela a pour conséquence que les modèles obtenus par les GAM correspondent mieux au jeu de données. Il est par contre plus délicat de les appliquer dans des conditions ou des régions différentes. Les GAM restent donc pour cette raison une approche moins généralisable que les GLM. Les trois moins bons modèles correspondent aux espèces devant être distribués le plus haut, à savoir *Plantago alpina*, *Poa alpina* et *Carex sempervirens*. Le manque de relevés à ces hautes altitudes peut être une raison pour expliquer les pourcentages bas de ces trois espèces. Le problème est le même pour les altitudes en-dessous de 800m, mais les espèces de basses altitudes ont quand même suffisamment de point de présence et absence pour permettre un bon calibrage et fournir un bon pourcentage de déviance expliquée. Une autre explication peut être que les interpolations concernant les données météorologiques sont moins bonnes que celles de plus basse altitude. En effet, il y a moins de stations météo aux hautes altitudes ce qui fait que les variables climatiques sont moins précises et qu'il y a donc moins de variance pour ces prédicteurs. Cela peut empêcher un bon calibrage des données et diminuer le pourcentage de déviance expliquée au modèle final.

Dans la plupart des publications aucune carte d'erreur ne vient compléter les cartes de distribution. Guisan *et al.*, (2002) propose de les incorporer de manière plus systématique surtout lorsqu'il s'agit de prendre des décisions cruciales dans des disciplines telles que la conservation. Grâce au logiciel GRASP, une carte d'erreur a pu être réalisée. Les endroits où il y a un grand risque d'erreur correspondent aux zones de faible probabilité de présence des espèces. Il s'agit de la plaine du Rhône pour toutes les espèces ainsi que les fonds de vallées pour *C. flacca*, *C. sempervirens*, *Plantago alpina* et *Poa alpina*.

Il ne faut pas oublier que les modèles ont été calibrés avec un jeu de données comportant des relevés à partir de 800 m. Une grande erreur pour les zones inférieures à 800m est donc tout à fait compréhensible. Dans la région des Diablerets et sur quelques sommets, des zones d'erreur élevée sont observées pour tous les modèles. Cela correspond à des régions dont les sommets dépassent les 3000m et dont aucun relevé n'a été effectué. Finalement, la carte d'erreur de *Brachypodium pinnatum* se distingue des autres. En effet, la carte nous annonce une erreur élevée sur les versants Nord, ce qui ne correspond pas aux résultats obtenus pour les autres espèces. Etant donné que ce modèle est le seul dont aucun des prédicteurs retenus par les stepwise ne réduisent significativement de la déviance, toute interprétation devient alors délicate et inutile.

Evaluation par l'approche sur le terrain

A notre connaissance très peu d'études passent par une phase d'évaluation sur le terrain après la calibration du modèle. Bien entendu, il serait plus juste de faire cette évaluation dans une autre région ou du moins sur une région plus vaste, afin d'avoir un jeu de données indépendant, mais cela ne nous a pas été possible. Le choix d'échantillonner une zone réduite de la zone d'étude complète est cependant judicieuse et sert en quelque sorte de « jeu de données indépendant ». Sur les huit espèces considérées dans cette étude, l'approche sur le terrain a confirmé les modèles pour cinq espèces. Les déterminations sur le terrain sont fiables excepté pour *B. erectus*. En effet, le manque de précipitation et la grande sécheresse de cet été ont empêché la végétation de se développer normalement et la plupart des champs visités étaient en général secs. Il ne restait très souvent que des feuilles dont celles de *B. erectus* que nous ne parvenions pas à déterminer en absence d'inflorescence. Un biais de notre part ne doit donc pas être négligé. Les trois espèces pour lesquelles les prédictions des modèles n'ont pas été confirmées sont *Carex sempervirens*, *Plantago media* et *Poa alpina*. D'après nos observations de terrain, il n'y a aucun doute concernant la détermination des ces trois espèces. Lorsque l'on regarde les tables de contingence, il apparaît que dans tous les cas il y a plus de présences prédites qui s'avèrent être des absences sur le terrain. Lorsque l'on compare cette approche avec les ROC des GAM, on remarque que *Carex sempervirens* et *Poa alpina* sont les deux espèces qui ont également obtenus les moins bonnes valeurs de ROC.

La troisième moins bonne valeur de ROC appartient à *Plantago alpina* qui n'est que marginalement significative d'après les tests de Fishers. En ce qui concerne *Plantago media*, les résultats sont très différents. En effet, l'approche ROC est très bonne alors que le test de Fisher nous montre que les observations ne correspondent pas aux prédictions du modèle. Une explication possible de ce résultat est le choix du seuil fixé à 0.5 pour ramener les probabilités comprises entre 0 et 1 par les modèles binomiaux à des 0 ou 1 pour les tables de contingence. En effet, *P. media* est une espèce très fréquente et ubiquiste, ce qui n'est pas facile à modéliser. Il est possible que le fait d'abaisser le seuil ou d'utiliser une approche plus optimale comme par exemple en prenant le seuil correspondant au meilleur kappa, aient donné de meilleurs résultats pour les tests de Fisher.

Finalement, cette approche sur le terrain nous a permis de remarquer que *Carex flacca* et *Plantago media* sont des espèces qui se rencontrent fréquemment au bord des chemins. Un échantillonnage plus centré sur ces derniers permettrait de voir s'il y a un intérêt de les considérer comme prédicteur dans d'autres études.

Scénarios de changements climatiques

Face aux changements climatiques les plantes de montagnes ont trois possibilités de réponse (Guisan et Theurillat, 2001) : (1) persister dans le climat modifié ce qui implique des changements dans la phénologie, physiologie ou encore des adaptations génétiques (Hugues, 2000), (2) migrer vers des habitats plus favorables, (3) s'éteindre. En outre, les changements climatiques pouvant induire des migrations, il peut alors apparaître de la compétition entre des espèces qui ne se trouvaient pas en contact auparavant. A l'aide de cartes de distribution potentielle de l'habitat, il est possible d'observer un changement dans les distributions potentielles de l'habitat des six espèces pour lesquelles une modification d'un des paramètres du climat a pu être effectuée. Cela se traduit par une régression d'aire ou par migration de l'espèce vers d'autres territoires. Tout comme Guisan et Theurillat (2000) ont pu l'observer pour *Leontodon helveticus* et de nombreuses autres espèces, les habitats favorables de *Carex sempervirens*, *Cynosurus cristatus* et *Plantago alpina* se décalent vers des altitudes plus élevées avec de grandes pertes de surfaces lors des changements climatiques.

La raison d'un tel déplacement est qu'une modification dans les paramètres du climat crée un déplacement des conditions de croissance optimales de ces espèces ce qui se reflète par la migration de ces différentes espèces dans de nouvelles zones. Ce phénomène est particulièrement bien observé chez *Plantago alpina*. En effet cette espèce montre une disparition très importante dans l'aire de distribution actuelle et quelques sites d'apparition sur les sommets. Comme il s'agit d'une augmentation de la température, l'espèce est contrainte de monter. Ainsi elle se retrouve confrontée à des situations de pente, d'enneigements plus extrêmes qui permettent d'expliquer le peu de surface nouvellement colonisée dans les modèles obtenus. La compétition avec les espèces déjà présentes ou d'autres ayant aussi effectués un déplacement vers le haut est aussi un facteur pouvant expliquer sa distribution future. Le problème avec les phénomènes de compétition est que ce travail de modélisation se base sur la niche réalisée, c'est à dire qu'il tient implicitement compte de la compétition actuelle. Avec les changements climatiques, de nouvelles espèces entreront en compétition. Etant donné que les effets du climat s'appliqueront également aux autres communautés et qu'il n'est pas possible de connaître leurs interactions futures, les incorporer dans les scénarios de changements climatiques est impossible. Il y a donc un biais en ce qui concerne les cartes de distribution future.

Les précipitations ont été modifiées pour *Carex sempervirens* et *Cynosurus cristatus* qui montrent un déplacement de leur aire de distribution vers les altitudes inférieures des versants Nord le long de la vallée du Rhône. Une telle migration peut s'expliquer par le fait qu'avec les changements climatiques menant à une diminution des précipitations, ces espèces sont contraintes à descendre sur les versants inférieurs pour trouver des précipitations correspondant à leur optimum. Ce résultat est surprenant étant donné que c'est au sommet que les précipitations sont les plus abondantes. Une diminution des précipitations devrait donc faire migrer les espèces vers le haut. L'observation des courbes de réponse de *C. Cristatus* (Annexe 6) permet une explication plausible. En effet, la courbe est plutôt étroite et tronquée et l'optimum correspond plutôt à de faibles précipitations. Une faible diminution des précipitations, comme cela est attendu, suffit à se retrouver rapidement dans de haute probabilité d'occurrence de l'espèce. La tendance est plus marquée chez *C. cristatus* que chez *C. sempervirens*.

Cela peut s'expliquer par le fait que la courbe de réponse de *C. sempervirens* est symétrique et plus large et que son optimum concernant les précipitations est plus élevé. De plus, *C. cristatus* préfère les pentes faibles. Comme la fréquence des fortes pentes augmente avec l'altitude, *C. cristatus* est contraint de descendre alors que *Carex sempervirens* qui n'est pas limité par ce facteur aura la possibilité de migrer aux sommets. En outre, *C. sempervirens* est une espèce déjà située dans des altitudes supérieures et les conditions des altitudes inférieures sont donc probablement plus limitantes pour lui. Un point important dont il faut tenir compte est que la modification des précipitations est effectuée sur des moyennes annuelles, or les prévisions de changement climatique pour ces dernières penchent plutôt vers une stabilisation des quantités de précipitations ainsi qu'à un déséquilibre de leur fréquence et répartition au cours de l'année (Rebetez, 2002), ce qui est difficilement modélisable dans notre cas. Les plantes seront confrontées à de longues périodes de sécheresse et de fortes précipitations en quelques jours voire quelques heures. De plus, il ne faut pas oublier que nous n'avons des simulations que pour un point unique dans les Préalpes vaudoises à 1000 m d'altitude. Les quantités de précipitations ne varieront certainement pas de manière uniforme dans toute la zone d'étude, ce qui fait que la distribution des espèces pourrait évoluer d'une autre manière.

La réponse aux changements climatiques de *Carex flacca*, *Plantago media* et *Poa alpina* relève plutôt du troisième cas de figure avancé plus haut (Guisan et Theurillat, 2001). Ces espèces n'ont pas montré de nouvel habitat colonisé, mais bien au contraire une forte réduction de leur aire initiale de distribution comme ce serait le cas pour de faibles changements climatiques (Guisant et Theurillat, 2000). Cette régression d'aire s'explique par le fait que les changements climatiques induisent des conditions beaucoup trop éloignées de la tolérance ou besoin de ces espèces. En général, la solution adoptée par les végétaux est la migration vers des conditions plus favorables (Theurillat et Guisan, 2001). Il semble que nos espèces ne peuvent pas le faire, l'extinction est donc la seule voie possible. Nos espèces doivent être limitées par des facteurs abiotiques vers le haut et biotiques vers le bas du gradient (Brown *et al.*, 1996). La limitation par les facteurs abiotiques des altitudes supérieures sera d'autant plus marquée pour une espèce alpine tel que *Poa alpina*, car s'y ajoute une réduction des surfaces de par la conicité des montagnes, l'augmentation de la pente et des conditions climatiques de plus en plus extrêmes.

D'autre part, tout comme pour *Plantago alpina*, la variable la plus importante pour *Poa alpina* est la température. Un changement de celle ci aura des répercussions très importantes sur la distribution de ces dernières.

Il paraît assez étonnant qu'une espèce aussi ubiquiste que *Plantago media* subisse une telle régression d'aire. De par son importante distribution actuelle, un décalage vers les altitudes supérieures serait particulièrement attendu pour cette espèce. Or ce n'est pas ce qui se passe. Une explication possible est que la température n'est pas une variable suffisamment importante dans le modèle pour expliquer sa distribution actuelle et future. En effet le modèle initial modifié pour cette espèce semble avoir comme autre variable significative le nombre de jour de gel. Cette dernière est plus hautement significatives et a une contribution plus importante que la température. Dans la courbe de réponse de cette espèce (Annexe 4) on voit que cette dernière à un optimum de températures d'environ moins quatre degrés mais ne supporte que peu de jour de gel. Le fait qu'elle ne supporte pas une période de grand froid prolongé peut être une raison faisant qu'elle ne peut monter plus haut. L'interprétation des cartes de différences entre distributions actuelles et futures doit être faite avec prudence, car certaines apparitions ou disparitions n'y sont peut être pas représentée à cause de la nécessité de fixer arbitrairement un seuil de 50% pour la définition de la présence ou l'absence de l'espèce. Pour limiter ce problème, il faudrait pouvoir plutôt travailler avec les probabilités d'occurrences que les présences/absences, mais ceci est plus compliqué. On peut toutefois se référer aux cartes de la figure 3 qui présentent les données « brutes ».

Finalement, cette étude a permis de construire des modèles prédictifs pour huit espèces des Préalpes vaudoises ainsi que des cartes de distributions potentielles de l'habitat présent et futur. De plus, il a été possible de comparer les deux types d'analyses proches ou complémentaires que sont les GLM et les GAM. Les modèles obtenus sont meilleurs pour les espèces des altitudes inférieures aussi bien pour les GAM que les GLM. La qualité des modèles d'espèce d'altitude pourrait être améliorée en ayant plus de stations météorologiques en altitude et en échantillonnant plus abondamment les hauts sommets afin d'avoir tout le gradient altitudinal possible. Il serait aussi judicieux d'utiliser des variables plus directement accessibles tels que l'enneigement, le permafrost et des caractéristiques de la topographique.

La vérification sur le terrain a donné des résultats surprenants par rapport aux méthodes classiques d'évaluation des modèles. En effet les meilleurs modèles avec l'approche classique ROC ne sont pas forcément les mêmes qui apparaissent dans l'étude du terrain. Ceci ouvre plein de questions concernant la méthode la plus juste pour la validation. Il serait donc intéressant d'effectuer des tests de Kappa et des tests de Fisher sur les modèles obtenus par les GLM pour avoir une meilleure idée de l'évaluation des modèles, ainsi que l'échantillonnage sur le terrain d'un plus grand nombre de points ce qui n'a pas été fait faute de temps.

En conclusion, les résultats obtenus par les scénarios de changements climatiques sont inquiétants et même dignes d'un film d'horreur pour nous, amis de la nature. En effet, tous les modèles des distributions futures des espèces étudiées montrent des extinctions assez massives pour chacune d'entre elles, sauf, dans une moindre mesure pour *C. Cristatus* ou alors un confinement dans les zones les moins favorables. Ceci est très inquiétant. Que va devenir le paysage que l'on connaît si bien ? Est-ce que la forêt va prendre le pas sur les prairies, pâturages et même pelouses alpines ? Et si oui, qu'advient-il des vaches qui dépendent assez fortement des prairies et pâturages ? Et tout l'écosystème lié aux pelouses tels que bouquetins, chamois et marmottes ? Et les communautés végétales vont-elles toutes suivre la même voie menant ainsi à une perte de diversité dramatique ? Tant de questions auxquelles il est difficile de répondre, et seul le temps nous le dira. Cependant, si l'homme faisait un effort il serait sans doute possible de limiter les dégâts, bien que la machine soit déjà bien en route. Peut-être que de tels modèles, dans lesquels d'autres paramètres que la température ou les précipitations sont modifiés, peuvent aider à lui faire prendre conscience que la planète a besoin d'être ménagée.

7 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes qui nous ont soutenu durant ce semestre, à savoir Antoine Guisan, Christophe Randin, Simone Peverelli, ainsi que Pascal Vittoz, Thomas Czaka, toujours disponible et à l'écoute pour toutes nos questions.

8 BIBLIOGRAPHIE

AESCHIMANN D., BURDET H. M., 1994. Flore de la Suisse, le nouveau Binz. Edition du griffon, Neuchâtel, Suisse. 603 pp.

BAKKENES M., ALKEMADE J.R.M., IHLE F., LEEMANS R., LATOUR J.B., 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology*. **8** (4): 390-407.

BERGER A., 2002. Global warming 2001. *Journal de physique IV*. **12** (10): 19-26.

BOUËT M., 1985. Climat et météorologie de la Suisse Romande. Payot. Lausanne, 170 pp.

BRÖNNIMANN O., 2003. Modelling the potential distribution of rare and endangered plant species. Travail de diplôme, Lausanne.

BROWN J.H., STEVENS G.C., KAUFMAN D.M., 1996. The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **27**: 597-623.

BUCKLAND S.M., THOMPSON K., HODGSON J.-G., GRIME J. P., 2001. Grassland invasions: effects of manipulations of climate and management. *Journal of Applied Ecology*. **38**: 301-309.

CANNELL M.G.R., THORNLEY J.H.M., MOBBS D.C., FRIEND A.D., 1998. UK conifer forests may be growing faster in response to increased N deposition, atmospheric CO₂ and temperature. *Forestry*. **71** (4): 277-296.

DELARZE R., GONSETH Y., GALLAND P., 1998. Guide des milieux naturels de Suisse. Delachaux et Niestlé, Lausanne, Paris. 415 pp.

DIRNBÖCK T., DULLINGER S., GRABHERR G., 2003. A regional impact assessment of climate and land-use on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*. **30**: 401-417.

ETTERSEN R.J., SHAW R.G., 2001. Constraint to adaptive evolution in response to global warming. *Science*. **294**: 151-154.

FITTER A.H., FITTER R.S.R., 2002. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*. **296**: 1689-1691.

FOLLAND C.K., RAYNER N.A., BROWN S.J., SMITH T.M., SHEN S.S.P., PARKER D.E., MACADAM I., JONES P.D., JONES R.N., NICHOLLS N., SEXTON D.M.H., 2001. Global

temperature change and its uncertainties since 1861. *Geophysical Research Letters*. **28** (13): 2621-2624.

GUISAN A., 2003. Simuler la répartition géographique des espèces et de la végétation (ou « Si De Candolle avait eu un ordinateur... »). *Saussurea*. 14-34.

GUISAN A., EDWARDS T.C., JR, HASTIE T., 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*. **157**: 89-100.

GUISAN A., THEURILLAT J.-P., 2000. Equilibrium modelling of alpine plant distribution: how far can we go? *Phytocoenologia*. **30**: 353-384.

GUISAN A., THEURILLAT J.-P., 2001. Assessing alpine plant vulnerability to climate change: a modelling perspective. *Integrated Assessment*. **1**: 307-320.

GUISAN A., ZIMMERMANN N.E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* **135**:147-186.

GRABHERR G., GOTTFRIED M., PAULI H., 1994. Climate effects on mountain plants. *Nature*. **369**: 448.

HOUGHTON J., 2001. The science of global warming. *Interdisciplinary Science Review*. **26** (4): 247-257.

HUGHES L., 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*. **15** (2): 56-61.

KLANDERUD K., BIRKS, H.J.B., 2003. Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *HOLOCENE*. **13** (1): 1-6.

LEHMANN A., OVERTON J. MCC., LEATHWICK J.R., 2002. GRASP: generalized regression analysis prediction. *Ecological Modelling*. **157**: 189-207.

MENZEL A., FABIAN P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*. **397**: 659.

MINORSKY P.V., 2002. Global warming-Effect on plant. *Plant Physiology*. **129** (4): 1421-1422.

PARMESAN C., 1996. Climate and species' range. *Nature*. **382** (6594): 765-766.

PHILLIPS O.L., GENTRY A.H., 1994. Increasing turnover through time in tropical forest. *Science*. **263** (5149): 954-958.

REBETEZ M., 2002. La Suisse se réchauffe: effet de serre et changement climatique. *Presse polytechniques et universitaires romandes*. Lausanne, 140 pp.

RODRIGUEZ-TRELLES F., RODRIGUEZ M.A., 1998. Rapid micro-evolution and loss of chromosomal diversity in *Drosophila* in response in climate warming. *Evol. Ecol.* **12**: 829-838.

SCHERRER B., 1984. *Biostatistique*. Ed. Gaëtan morin, Paris. 850 pp.

SHUGART H.H., FRENCH N.H.F., KASISCHE E.S., SLAWSKI J.J., DULL C.W., SHUCHMAN R.A., MWANGI J., 2001. Direction of vegetation change using reconnaissance imagery. *Global Change Biology*. **7**: 247-252.

SPARKS T.H., MENZEL A., 2002. Observed changes in seasons: An overview. *International Journal of Climatology*. **22** (14): 1715-1725.

THEURILLAT J.-P., GUISAN A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the european alps : a review. *Climatic Change*. **50**: 77-109.

VIRON O., DEHANT V., GOOSSE H., CRUCIFIX M., 2002. Effect of global warming on the length-of-day. *Geophysical Research Letters*. **29** (7) : Art n°1146.

VOLK M., KÖRNER C., 2001. Genotype x elevated CO₂ interaction and allocation in calcareous grassland species. *New Phytologist*. **151**: 637-645.

WALTHER G.-R., POST E., CONVEY P., MENZEL A., PARMESAN C., BEEBEE T. J.C., FROMENTIN J.-M., HOEGH-GULDBERG O., BAIRLEIN F., 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*. **416**: 389-395.

Sites internet :

www.meteosuisse.ch
www.cscf.ch/grasp.

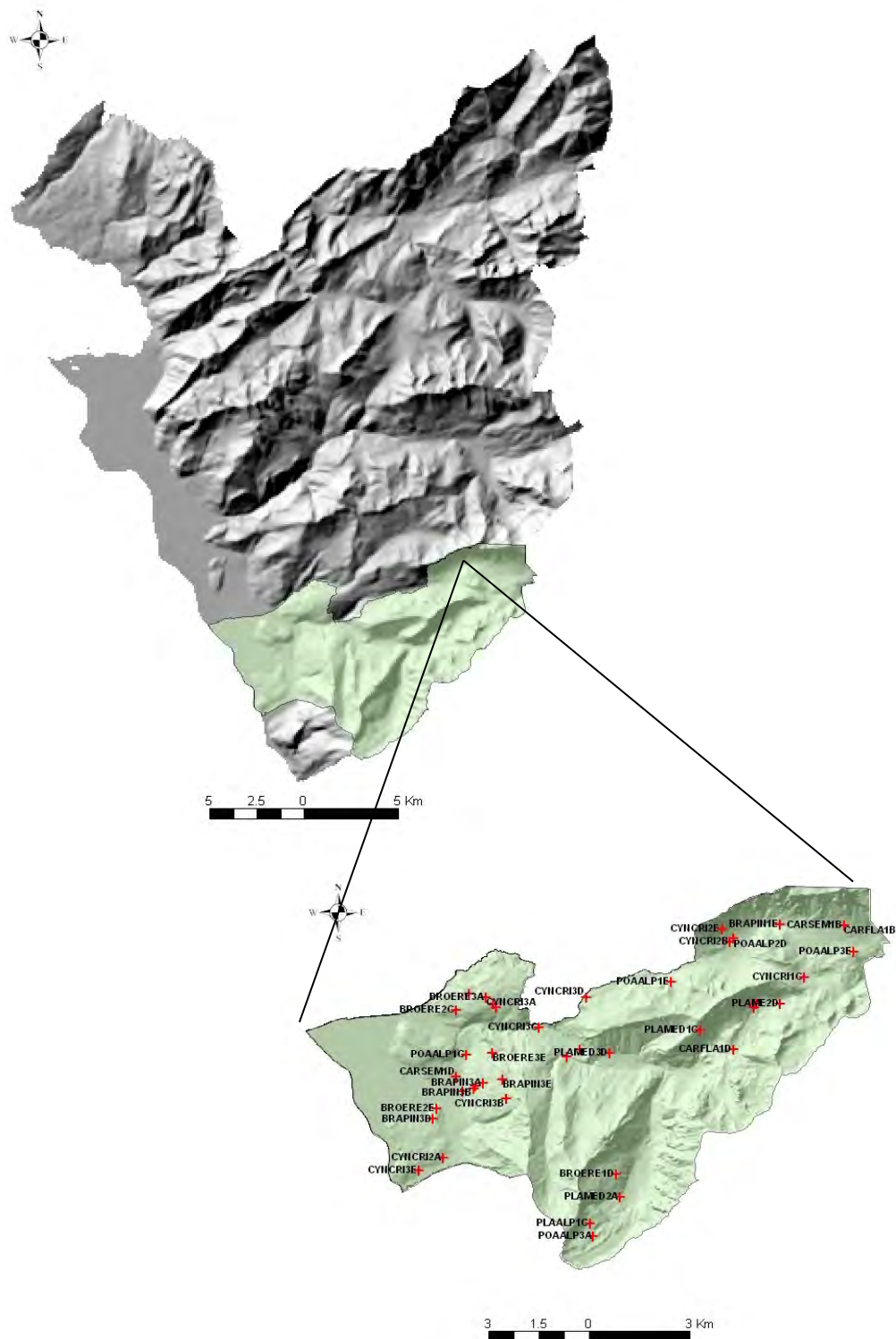
.

9 ANNEXE

Annexe 1: Tableau de la somme des précipitations (mm/année) et de la moyenne des températures (degré K) de 1961 à 1990 ainsi que les prévisions pour 2071 à 2100 fournies par le département de géosciences de l'université de Fribourg. Les cartes SIG ont été modifiées en tenant compte de la différence entre la moyenne des années 2071-2100 et celles de 1961-1990.

Année	1961-1990	2071-2100	1961-1990	2071-2100
	Somme des précipitations		Moyenne de température	
1	1373.45	1464.64	280.54	283.25
2	1583.22	1514.99	279.64	282.97
3	1196.00	1524.39	279.62	283.10
4	2069.44	1480.26	279.54	282.39
5	1695.46	1706.90	278.55	282.61
6	1901.74	1897.80	278.42	282.93
7	1468.96	1527.49	280.02	283.95
8	1635.20	1935.86	279.99	282.27
9	1560.95	1365.07	279.38	281.96
10	1663.49	1445.48	280.09	282.65
11	1375.33	1286.47	279.63	284.54
12	1765.96	1687.92	280.21	283.97
13	1167.58	1293.74	278.69	283.45
14	1399.83	1675.99	279.94	284.31
15	1905.50	1759.22	279.19	282.47
16	1759.88	1497.41	278.84	282.23
17	1614.93	1381.75	278.37	284.86
18	1749.33	1674.44	280.01	282.75
19	1317.46	1997.58	279.63	283.12
20	1381.33	1508.94	280.43	282.99
21	2122.04	1369.07	279.80	284.16
22	1749.31	1726.67	278.67	282.99
23	1969.25	1588.91	278.03	283.56
24	1533.89	1286.38	279.55	284.83
25	1663.37	1190.17	279.59	286.34
26	1369.61	1506.96	279.52	285.36
27	1231.77	1558.21	280.18	283.95
28	1655.81	1678.01	279.57	283.20
29	1553.70	1386.66	281.06	285.49
30	1480.26	1473.40	280.31	284.54
Moyenne	1597.14	1546.36	279.57	283.57
Différence	-50.78		4.01	

Annexe 2: Zone d'étude complète et réduite permettant la vérification des modèles sur le terrain (commune de Bex) avec les points de relevés pour les différentes espèces selon les différentes strates.

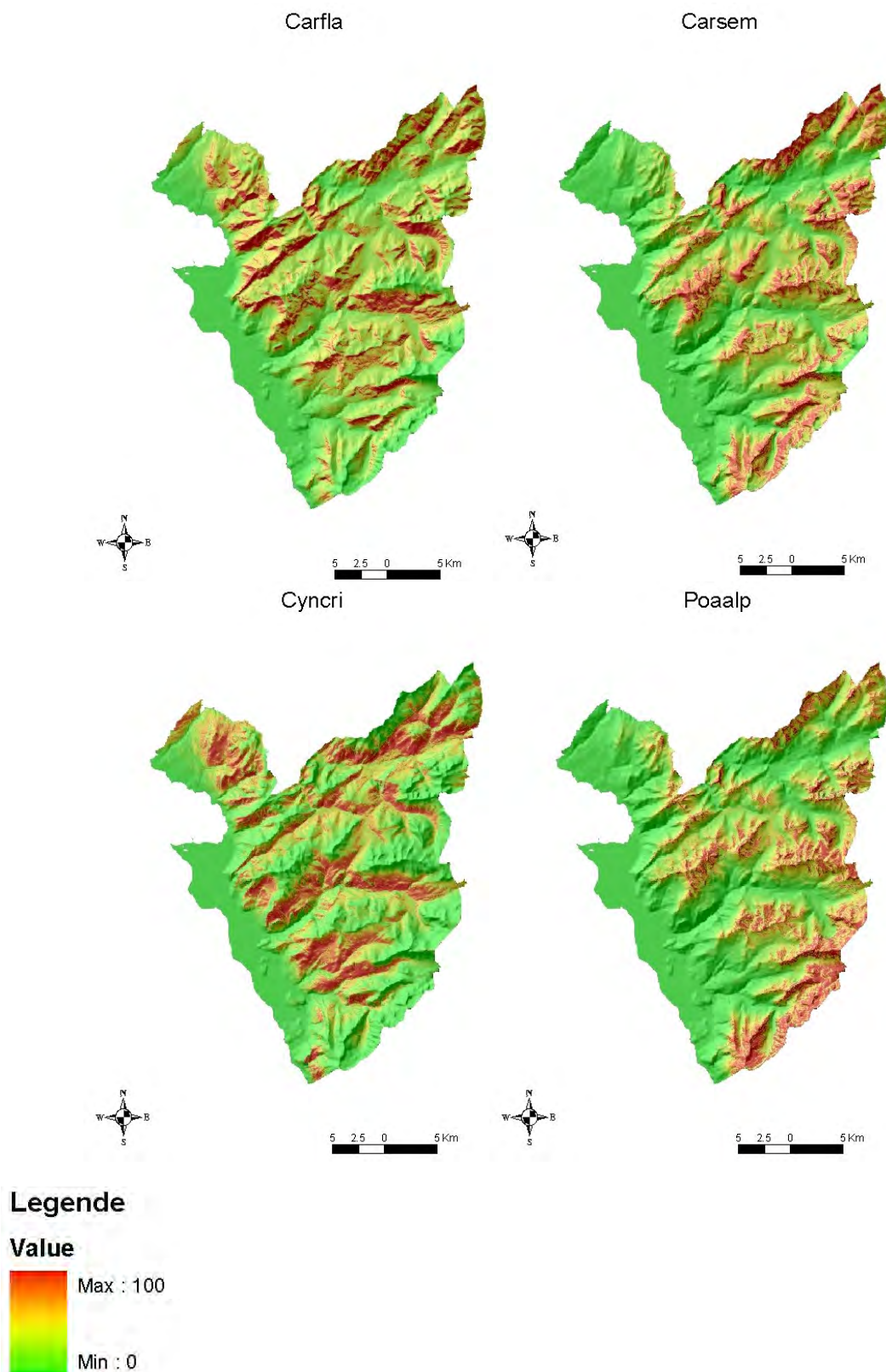


Annexe 3: Tableau des prédictors retenus par les GLM stepwise et leur degré de liberté(df), la valeur du test de t (t-value) et sa p-value (pval), la p-value du Chi carré (P-value (Chi)).

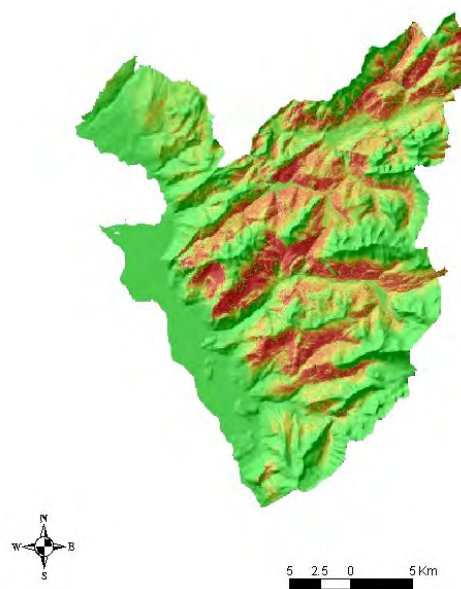
Espèce	Prédicteurs retenus	df	t-value	pval	P-value(Chi)
<i>Brachypodium pinnatum</i>	sradyy	210	-2.325	0.0210	0.0062
	sfroyyy	209	-2.957	0.0035	< 0.0001
	sfroyysq	208	1.895	0.0594	0.9303
	aspectinsq	207	1.660	0.0985	0.1226
	aspectcos	206	-2.481	0.0139	0.0010
	slp25	205	1.912	0.0573	0.0853
	slp25sq	204	-1.581	0.1155	0.0082
	taveyysq	210	2.505	0.0130	< 0.0001
<i>Bromus erectus</i>	sradyy	209	2.098	0.0372	0.018
	precyy	208	2.065	0.0402	0.414
	precyysq	207	-2.055	0.0412	0.030
	topo100	206	1.881	0.0614	0.067
	sradyysq	210	3.869	0.0001	< 0.0001
<i>Carex flacca</i>	precyy	209	1.993	0.0476	0.0004
	precyysq	208	-1.931	0.0548	< 0.0001
	sfroyy	207	-2.403	0.0172	0.1074
	sfroyysq	206	1.958	0.0516	0.6807
	slp25	205	3.226	0.0015	0.0009
<i>Carex sempervirens</i>	taveyysq	210	-2.787	0.0058	< 0.0001
	precyy	209	1.717	0.0874	< 0.0001
	precyysq	208	-2.025	0.0441	0.252
	slp25sq	207	3.979	0.0001	0.001
	topo100	206	3.813	0.0002	< 0.0001
<i>Cynosurus cristatus</i>	taveyy	210	3.627	0.0004	< 0.0001
	taveyysq	209	-3.057	0.0025	0.1055

Espèce	Prédicteurs retenus	Df	t-value	p-value	P-value(Chi)
<i>Poa alpina</i>	sradyy	208	4.323	<0.0001	< 0.0001
	sfroyy	207	3.136	0.0020	0.0404
	slp25	206	1.850	0.0658	0.4110
	slp25sq	205	-2.042	0.0425	0.0238
	taveyy	210	1.747	0.0823	< 0.0001
	taveyysq	209	-2.369	0.0188	0.015
	sradyy	208	1.777	0.0772	0.607
	sradyysq	207	-1.851	0.0657	0.016
	sfroyy	206	1.759	0.0800	0.055
	aspectcossq	205	-1.539	0.1253	0.134
	topo100	204	2.652	0.0086	0.086
	topo100sq	203	-1.641	0.1024	0.384
	aspectsin	202	1.952	0.0524	0.108
	aspectsinsq	201	-1.539	0.1253	0.129
	slp25	200	-2.563	0.0111	0.976
<i>Plantago media</i>	slp25sq	199	2.747	0.0066	0.005
	taveyy	210	1.790	0.0750	< 0.0001
	taveyysq	209	-2.339	0.0203	< 0.0001
	precyysq	208	-1.956	0.0519	0.0936
	sfroyy	207	-2.176	0.0307	0.0013
<i>Plantago alpina</i>	slp25	206	2.228	0.0270	0.1668
	slp25sq	205	-2.461	0.0147	0.0022
	aspectcos	204	-2.197	0.0291	0.0220
	taveyy	210	3.569	0.0004	0.528
	taveyysq	209	-3.612	0.0004	< 0.0001
	precyy	208	1.662	0.0980	0.104
	aspectsin	207	2.506	0.0130	0.002
	topo100	206	3.299	0.0011	0.001
	slp25sq	205	-3.580	0.0004	< 0.0001

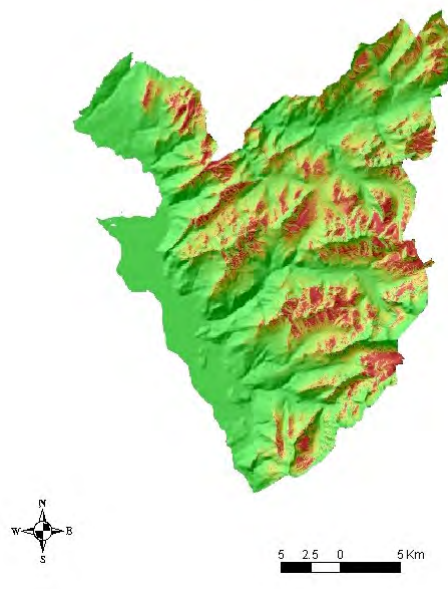
Annexe 4: Cartes de distribution potentielle de l'habitat des huit espèces d'après les modèles GLM. La légende représente la probabilité d'occurrence des espèces comprise entre 0 et 100 %.



Plamed



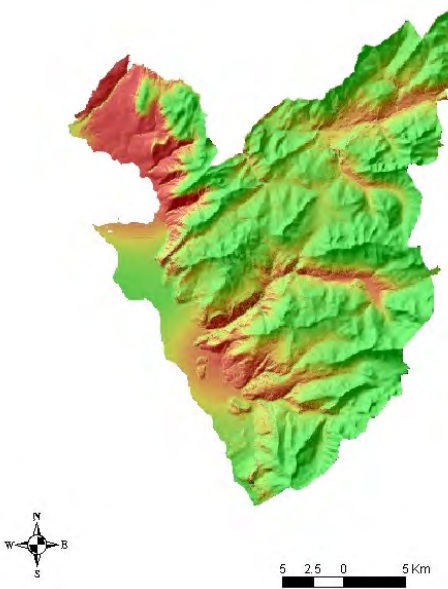
Plaalp



Brapin

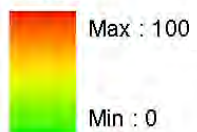


Broere



Legende

Value

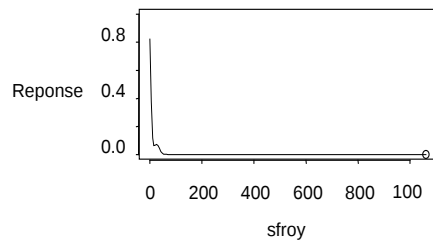


Annexe 5: Tableau des prédicteurs retenus par les GAM stepwise pour chaque espèce, ainsi que leur proportion de déviance expliquée, la valeur du Chi-carré et la p-value associée.

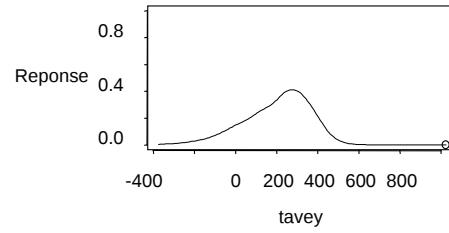
Espèce	Prédicteurs retenus	Déviance expliquée (%)	Chi-carré	p-value
Brachypodium pinnatum	sfroyy	21.42	1.76	0.52
	aspectcos	13.31	3.15	0.37
	slp25	8.45	5.32	0.13
Bromus erectus	sfroyy	32.32	6.13	0.048
	slp25	10.64	4.41	0.21
Carex flacca	taveyy	8.38	10.87	0.01
	sfroyy	5.43	0.87	0.77
	aspectcos	6.85	3.32	0.34
	topo100	5.72	10.31	0.01
	slp25	7.43	5.36	0.14
Carex sempervirens	precyy	5.97	12.64	0.005
	sfroyy	5.52	15.86	0.001
	slp25	8.58	4.72	0.18
	topo100	9.36	3.85	0.26
Cynosurus cristatus	sradyy	12.28	3.82	0.28
	precyy	5.86	10.46	0.01
	sfroyy	16.47	21.66	<0.001
	slp25	5.17	8.32	0.04
Poa alpina	taveyy	14.85	12.17	0.005
	slp25	5.60	11.30	0.01
Plantago media	taveyy	6.40	10.20	0.02
	sfroyy	8.47	10.06	0.01
	slp25	8.34	8.86	0.28
	aspectcos	6.50	4.58	0.18
Plantago alpina	taveyy	12.1	16.05	<0.001
	topo100	4.61	1.23	0.74
	slp25	7.79	5.68	0.13

Annexe 6: Courbe de réponse des prédicteurs apportant une réduction de déviance significative dans les GAM.

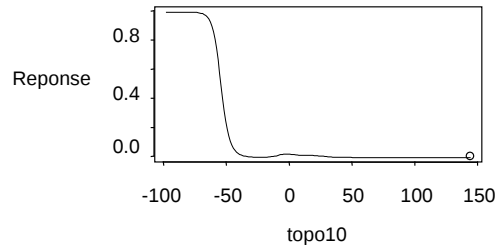
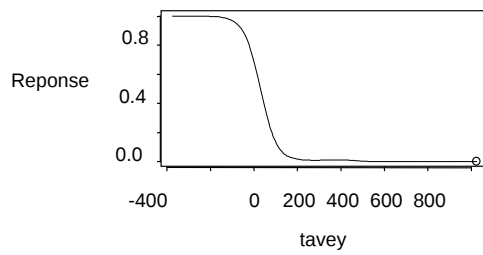
Broere



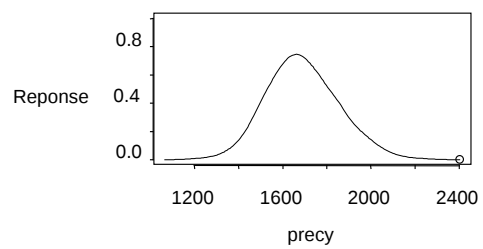
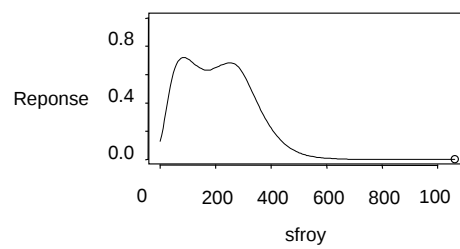
Plaalp



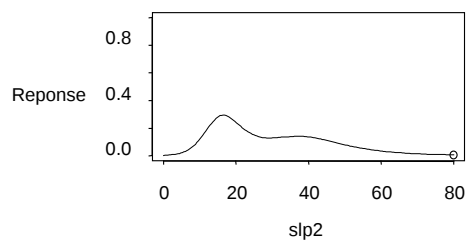
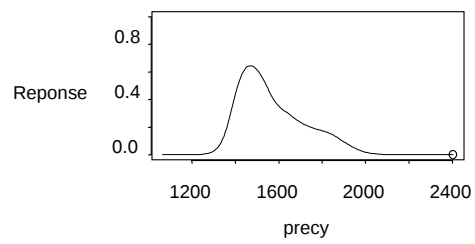
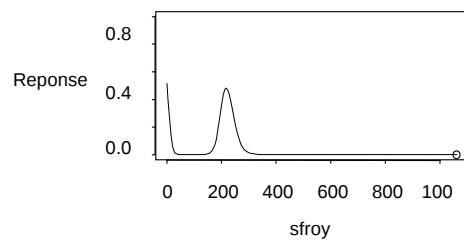
Carfla



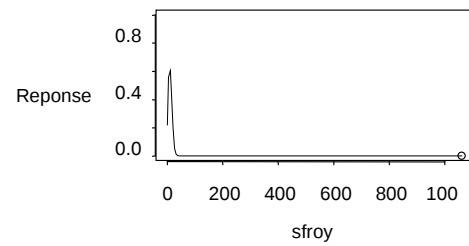
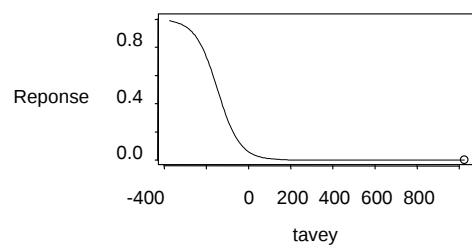
Carsem



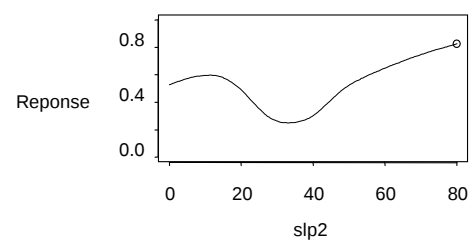
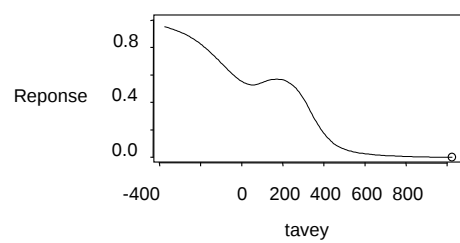
Cyncri



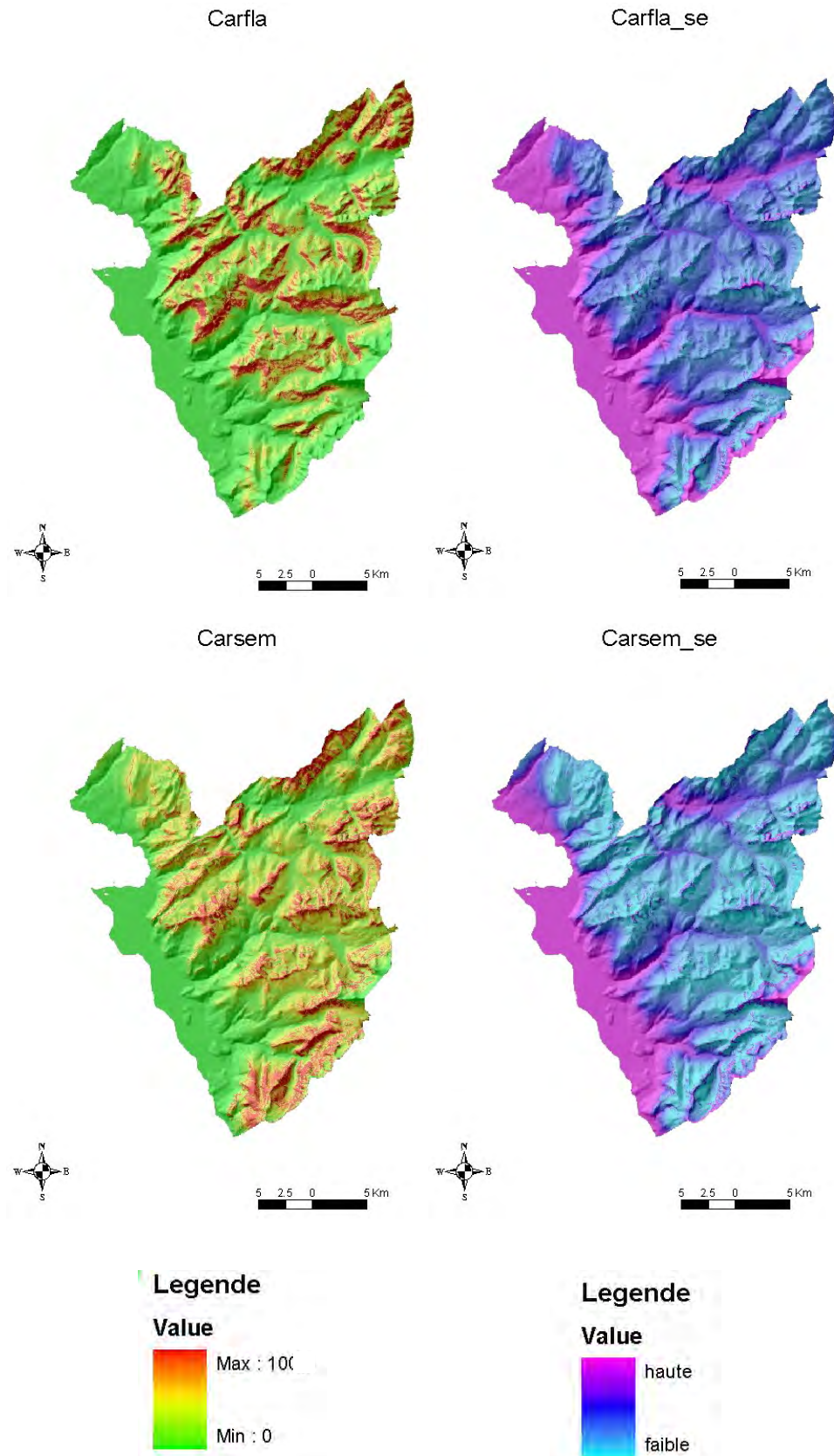
Plamed



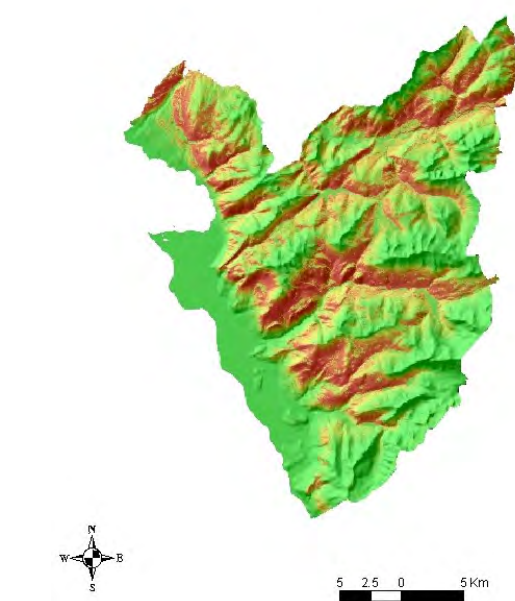
Poalp



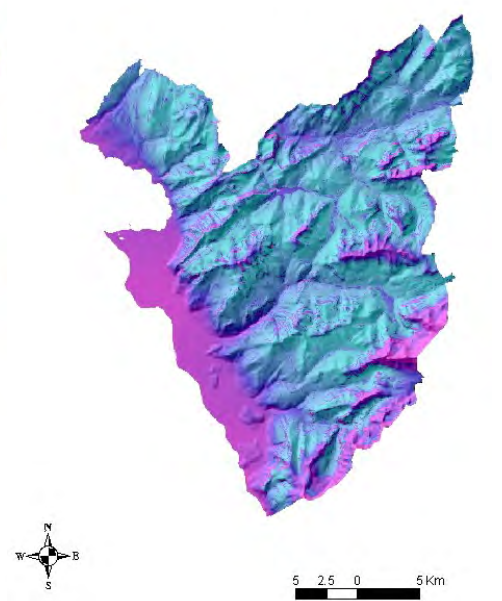
Annexe 7: Cartes de distribution potentielle de l'habitat des huit espèces (à gauche) et leur carte d'erreur associée (à droite) d'après les modèles GAM. Pas de carte d'erreur disponible pour *Bromus erectus* et *Plantago media*. La légende des cartes de distribution représente la probabilité d'occurrence des espèces comprise entre 0 et 100 %.



Cyncri



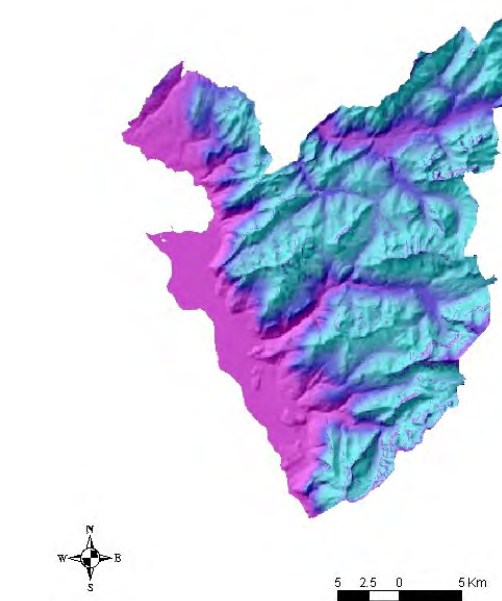
Cyncri_se



Poaalp



Poaalp_se



Legende

Value

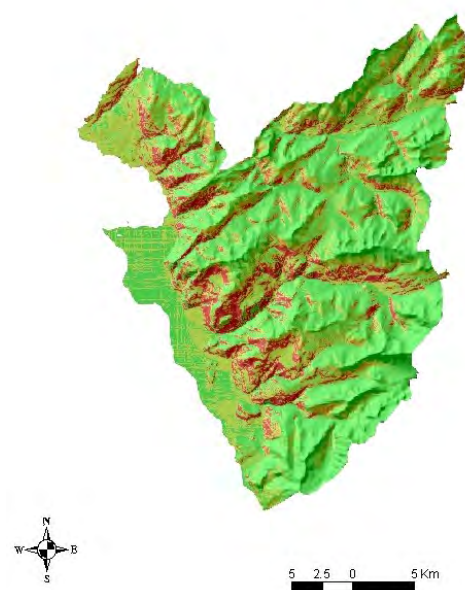


Legende

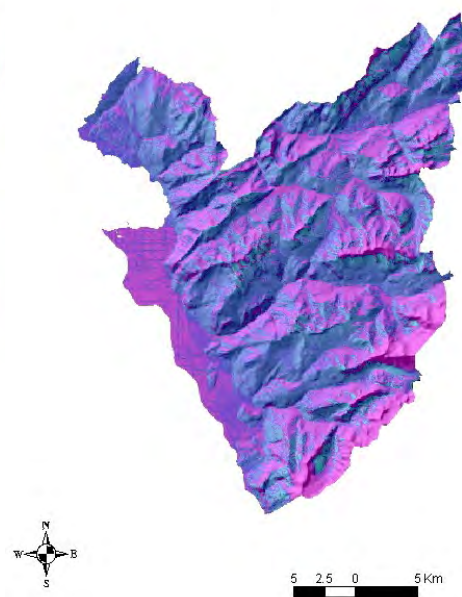
Value



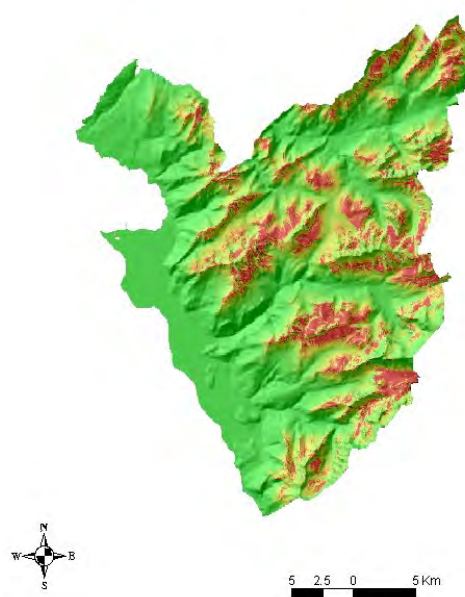
Brapin



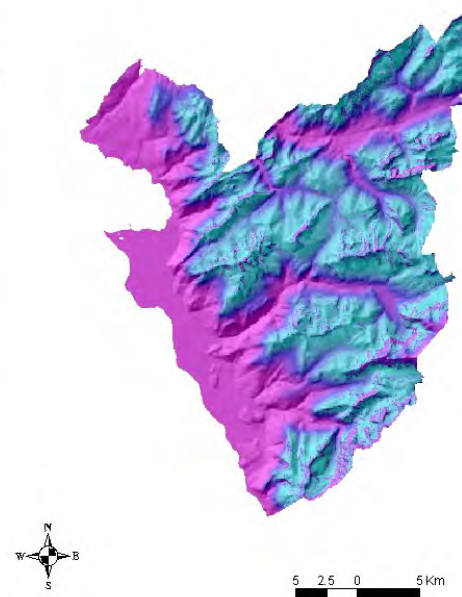
Brapin_se



Plaalp



Plaalp_se



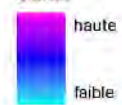
Legende

Value



Legende

Value



Broere

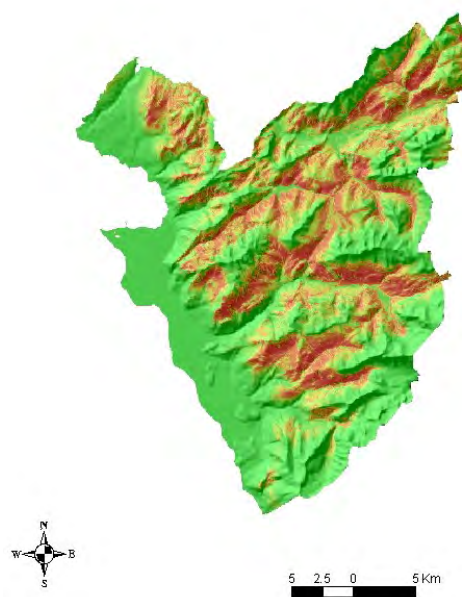


Legende

Value

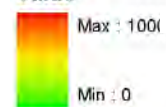


Plamed



Legende

Value



Annexe 8: Tableau des présences/absences observées sur le terrain ou prédites par le modèle pour les huit espèces. Préd. = prédit, Obs. = observé

Préd.	Obs.	Préd.	Obs.	Préd.	Obs.	Préd.	Obs.	Préd.	Obs.	Préd.	Obs.	Préd.	Obs.	Préd.	Obs.
brapin	brapin	broere	broere	carfla	carfla	carsem	carsem	plamed	plamed	plaalp	plaalp	cyncri	cyncriobs	poaalp	poaalp
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Annexe 9: Tables de contingence des présences/absences prédits par les modèles et observés pour les huit espèces étudiées.

		observé	
		présence	absence
prédit	présence	38	4
	absence	1	0

		observé	
		présence	absence
prédit	présence	41	1
	absence	1	0

		observé	
		présence	absence
prédit	présence	29	6
	absence	2	6

		observé	
		présence	absence
prédit	présence	29	11
	absence	0	3

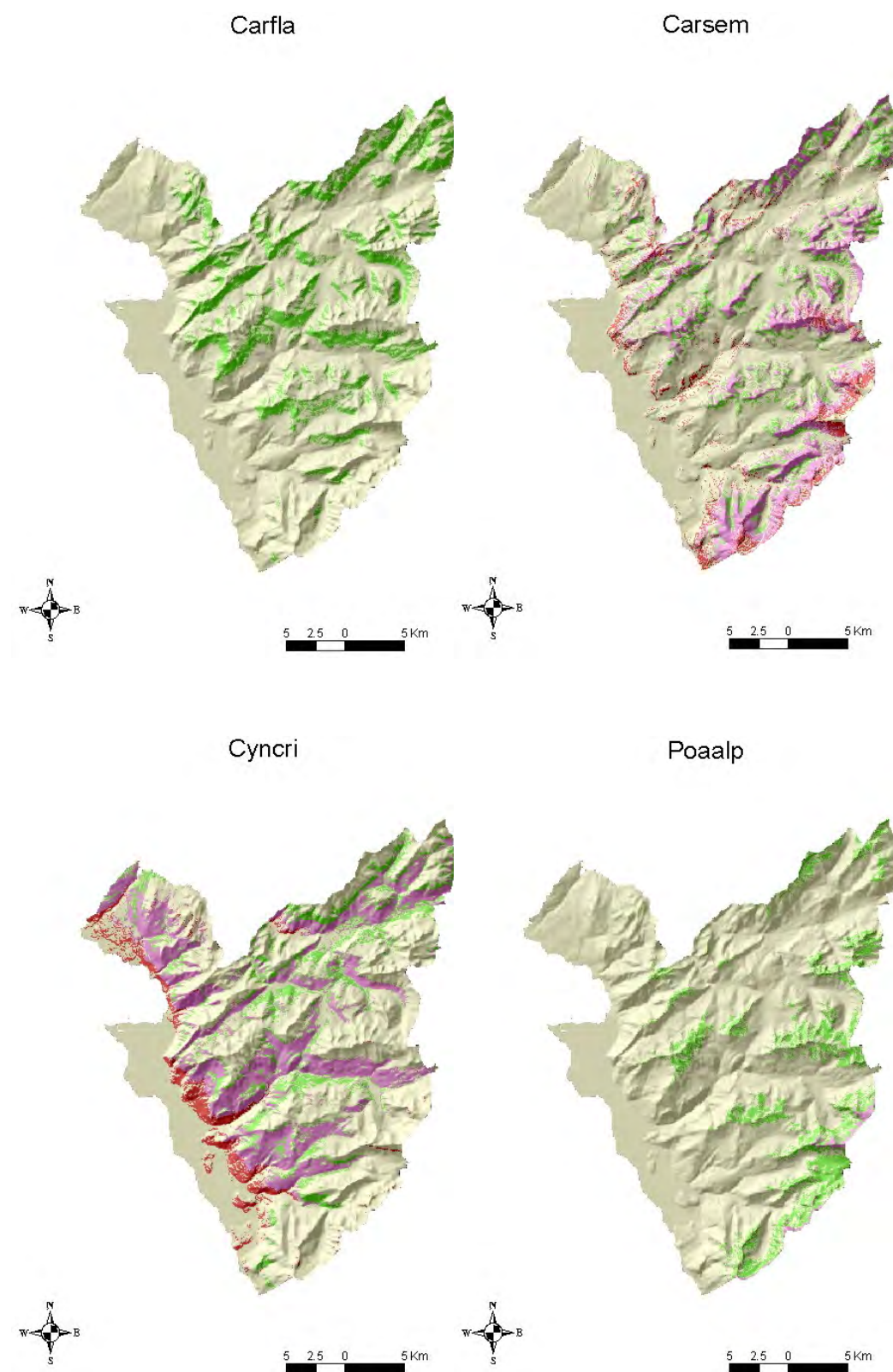
		observé	
		présence	absence
prédit	présence	36	3
	absence	2	2

		observé	
		présence	absence
prédit	présence	25	7
	absence	6	5

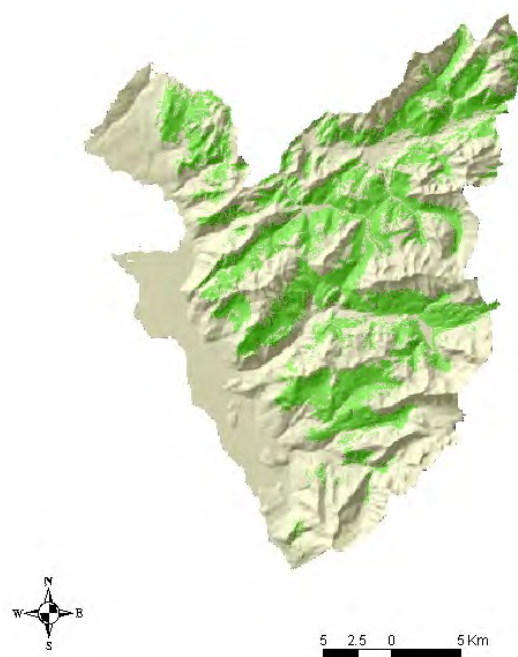
		observé	
		présence	absence
prédit	présence	26	13
	absence	0	4

		observé	
		présence	absence
prédit	présence	34	5
	absence	2	2

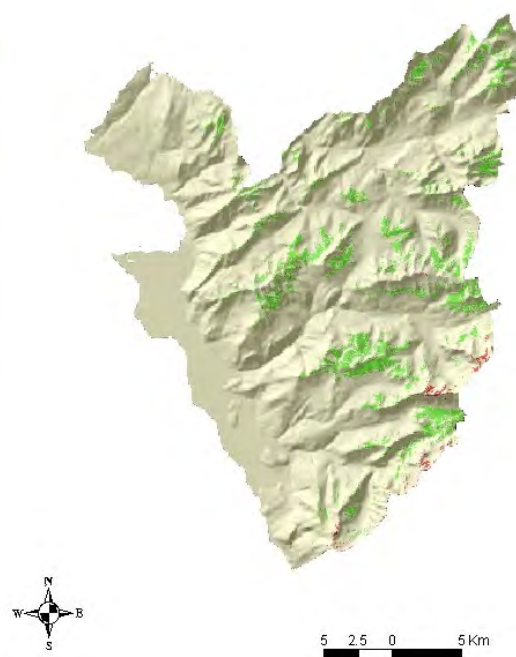
Annexe 10: Cartes représentant les disparitions et les apparitions des six espèces (*C. flacca*, *C. sempervirens*, *P. media*, *Plantago alpina*, *C. cristatus* et *Poa alpina*) entre les cartes potentielles actuelles et dans les conditions de changements climatiques.



Plamed



Plaalp



Legende

VALUE

- apparue
- tjrs présente
- tjrs absente
- disparue