

Introduction

L'un des buts prédominant en écologie végétale consiste à comprendre les relations entre les plantes et l'environnement. Dans cette optique, les systèmes d'information géographique permettent la construction de modèles prédictifs pour des végétaux pris individuellement, des communautés végétales ou des biomes.

Les applications directes de ces modèles sont variées. Pour ce qui concerne la biologie de la conservation, il est possible de trouver de nouveaux habitats potentiels pour la sauvegarde des espèces rares (Broennimann, 2003). Par ailleurs, il est aussi possible d'envisager des scénarios d'impact des changements climatiques sur la distribution des espèces (ex : Guisan & Theurillat, 2001).

La théorie de la niche développée par Hutchinson en 1957 et celle du pseudo-équilibre (voir Guisan 2003), qui considère la distribution des espèces en équilibre avec l'environnement (climax) constituent le postulat de base pour l'élaboration de modèles statiques en écologie végétale.

Afin de modéliser au mieux les réponses des plantes dans leur environnement, on cherche des variables qui ont un impact direct sur la physiologie de l'espèce (variable proximale) (Fig. 1). Cependant ce type de variable, comme par exemple les variables climatiques, exigent des procédures d'interpolation complexes. Un exemple est celui de l'utilisation d'un réseau de mesures météorologiques combinées aux modèles numériques d'altitude (Zimmermann & Kienast, 1995). Ces variables peuvent donc s'avérer moins précises que les variables de type distales (ayant un impact indirect sur l'espèce considérée) dont elles sont dérivées. En effet des erreurs supplémentaires peuvent dès lors s'ajouter lors du processus de modélisation (propagation d'erreurs). A partir d'un modèle numérique d'altitude il est par contre facile d'en dériver des variables topographiques (distales), comme la pente, la courbure, l'exposition, les sommets, les milieux de pente et l'ombrage. Ainsi moins d'erreurs sont générées. De plus, ces dernières conditionnent toute une série d'autres variables tout aussi importantes pour expliquer la distribution des plantes : le micro-climat, les radiations, les nutriments, le couvert neigeux ou rocheux.

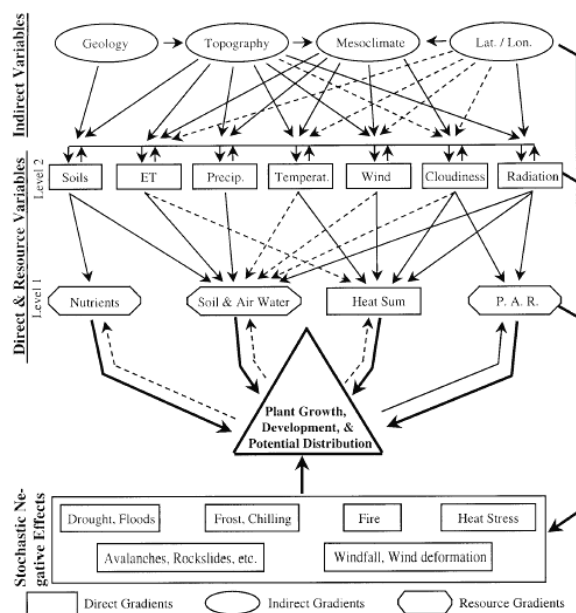


Figure 1 : Modèle conceptuel de l'espace environnemental théorique des espèces et de leur importance pour expliquer leur distribution. Les variables proximales (directes et ressources) ont un impact direct sur les espèces. Les variables distales sont également appelées variables indirectes. La distribution des espèces est également influencée par des événements occasionnels et parfois extrêmes, d'origine naturelle ou anthropiques ou encore historique. Ce schéma est tiré de Guisan & Zimmermann (2000).

Pour l'élaboration de modèles prédictifs, toute la complexité réside dans le choix des prédicteurs (climatiques ou/et topographiques) et de l'échelle spatiale utilisée. Du fait de la difficulté de stockage des données, le choix de la résolution¹ se répercute fréquemment sur le choix de l'échelle spatiale et de la superficie d'étude (cours AMSEV, Guisan, 2003). Par exemple, Brzeziecki et al. (1993) ont prédit la distribution des communautés forestières suisses à la résolution du kilomètre. A l'échelle des Alpes suisses, Zimmermann & Guisan (1999) utilisèrent la résolution de 50 m dans le but de modéliser la distribution de communautés végétales alpines. Il est important de remarquer que la taille de la zone étudiée diminue avec la résolution utilisée. Dans le cas d'une résolution au 1 m, le choix d'une zone d'étude plus petite est nécessaire. En effet, un modèle numérique de terrain au 1 m sur toute la Suisse (41 milliards de points) rend difficile la gestion de ces données.

Grâce à ce dernier, les données topographiques, facilement dérivées des modèles numériques de terrain, deviennent de plus en plus précises, représentent au mieux la « microtopographie ». Les prédicteurs topographiques augmentent ainsi leur pouvoir prédictif au fur et à mesure que l'on s'approche d'une échelle locale plus fine. Ceci s'explique également par le fait que le climat reste assez homogène dans une petite région d'étude considérée. Par contre, lorsque les variables climatiques ne sont plus « constantes », le pouvoir des prédicteurs topographiques devient moindre (modélisation des reptiles en Suisse : Guisan & Hofer (2003)).

En règle générale, les recherches effectuées à des échelles locales, dans des régions de montagnes par exemple, sont basées partiellement ou entièrement sur des variables topographiques ou leurs dérivés (Brzeziecki et al. 1993 ; Brown 1994 ; Guisan et al. 1998, 1999). Par contre, les modèles à large échelle utilisent préférentiellement des paramètres bioclimatiques (par ex. Box 1981 ; Huntley et al. 1995 ; Neilson 1995). A cette échelle, les prédicteurs topographiques perdent leurs pouvoirs prédictifs au profit de ceux ayant un impact physiologique direct comme par exemple la radiation solaire ou l'évapotranspiration.

À une échelle locale, les prédicteurs de type distal ou indirect (tel que la topographie) peuvent expliquer une plus grande part de la variance d'un modèle prédictif que certains prédicteurs de type proximal ou direct. En revanche, l'utilisation de variables explicatives distales ne permet pas d'appliquer les modèles à d'autres situations géographiques car une même combinaison de variables topographiques peut révéler une combinaison différente de prédicteurs proximaux. Bref, la généralité et l'applicabilité des modèles se trouvent ainsi limitée avec l'utilisation de prédicteurs distaux.

L'apparition du modèle numérique laser à haute résolution au 1 m (MNT Laser 1 m) apporte des améliorations dans certaines applications comme l'analyse du paysage, l'aménagement urbain et la télécommunication. De nombreuses associations s'intéressent vivement à l'utilisation de cette nouvelle technologie, en exemple : le Laboratoire de Système d'Information Géographique de l'EPFL (LASIG), les administrations cantonales romandes (Genève, Fribourg, Neuchâtel, Jura, Vaud), l'Association pour le Système d'Information du Territoire Vaudois (ASIT-VD), la Coordination de l'Information Géographiques et les Systèmes d'Information Géographiques (COSIG) et pourquoi pas, le Département d'Ecologie et d'Evolution (DEE) de l'Université de Lausanne pour ce qui concerne la modélisation en écologie végétales. Dans cette dernière, à l'institut d'écologie, la plupart des recherches passées et en cours utilisent le modèle numérique de terrain à une résolution de 25 m (cf. pour plus d'informations sur le projet MODIPLANT de l'Université de Lausanne (DEE), <http://ecospat.unil.ch/index.pl/research>). Il serait judicieux de pouvoir constater l'apport supplémentaire de variables distales à haute résolution (MNT Laser 1m). Des variables topographiques « fines » ont déjà été calculées dans un travail de diplôme effectué par Thierry

¹ Résolution : taille d'un pixel, plus petite unité géographique d'une couche raster dans ArcMAP

Lassueur (2004) avec lesquelles il a érigé des modèles univariés. Cependant, des modèles univariés (comme seul prédicteur, la pente) appliqués à une zone peuvent être faussés par le fait qu'une espèce n'occupe qu'une seule tranche altitudinale. Pour cette raison, nous proposons de déterminer si des modèles multivariés avec des variables topographiques « fines » apportent une amélioration dans les modèles prédictifs en écologie végétale.

Ainsi, ce travail tente d'expliquer la distribution des espèces végétales en fonction de la microtopographie à l'aide d'un modèle numérique de terrain à très haute résolution (MNA Laser). Plus précisément, un des objectifs est de définir à quelle échelle chaque prédicteur topographique est plus pertinent. Il est également important de déterminer si le modèle numérique d'altitude Laser au 1 m (MNA Laser 1m) apporte significativement une amélioration aux modèles prédictifs en écologie végétale. La comparaison des modèles basés sur des variables topographiques « grossières » (25 m) et des modèles basés sur des variables topographiques « fines » (Laser 1 m) a un intérêt pour les recherches futures. De plus, une analyse des réponses des groupes fonctionnels (exemple : type biologique,...) aux différentes échelles paraît intéressante.

Matériel & Méthode

Modèle numérique de terrain laser (MNT laser à 1m)

La construction du modèle laser a été effectuée grâce aux systèmes LIDAR (Light Detection And Ranging) aéroportés : un avion, survolant une zone à mesurer, émet des impulsions de lumière laser en direction du sol. Le temps pour parcourir le chemin émetteur-sol-émetteur correspond au double de la distance de l'avion au sol. Jusqu'à 5'000 impulsions sont enregistrées par seconde. Les données sont traitées conjointement par un GPS (Global Positioning System) et une centrale inertielle afin d'en déduire un fichier de coordonnées (x,y,z).

Contraintes du modèle Laser

Le MNA Laser est un outil essentiel dans plusieurs domaines. Par contre, son application demeure parfois difficile : les données sont volumineuses (41 milliards de points à l'échelle de la Suisse) et difficile à stocker. De plus, à cause d'un trop faible budget investi pour sa création, sa limite altitudinale se trouve à 2100m. En effet l'Office Fédéral suisse de la Topographie (SWISSTOPO) c'est essentiellement intéressé aux terrains cultivables se situant ainsi en dessous de la limite naturelle des forêts. Ceci constitue une sérieuse limitation dans la modélisation en écologie végétale.

Zone d'étude et choix des espèces

Pour ce travail les données de MODIPLANT sont disponibles : 520 relevés situés dans des milieux ouverts déterminés par un échantillonnage aléatoire stratifié (8 strates d'altitude, 4 de pente et 4 d'exposition). Un inventaire exhaustif a été effectué dans chacun de ces relevés et la méthode utilisée est celle des carrés imbriqués (carrés de 1m², 4m², 16m², 64m²). Les présences/absences des espèces sont déterminées dans chacun des carrés et l'abondance, uniquement dans le carré de 4m². Parmi les espèces inventoriées dans les relevés MODIPLANT, effectué sur les Préalpes vaudoises, seules les espèces ayant une occurrence de plus de 20 fois ont été sélectionnées : 103 espèces retenues (Annexe 1).

Prédicteurs topographiques et climatiques

Les espèces choisies se trouvent dans 125 relevés de MODIPLANT utilisés pour la calibration (Annexe 2). De ces derniers, les données suivantes ont pu être définies : pente, orientation transformée en norditude et en estitude (Annexe 3), convexité plan et convexité profil (calculés par la fonction « Curvature » dans le programme ArcInfo) (Fig 2). Chacun de ces prédicteurs topographiques a été mesuré à 8 fenêtres focales différentes : Laser 5x5 (fenêtre de 25 m²), Laser 9x9, Laser 15x15, Laser 25x25, Laser 51x51, MNA25 3x3 (fenêtre de 5625 m²), MNA25 5x5, MNA25 7x7 (Fig. 3). Ces prédicteurs topographiques déterminés à des fenêtres focales différentes ont été repris du travail de diplôme de Thierry Lassueur (2004). En plus des prédicteurs topographiques, les prédicteurs climatiques mentionnés dans la Table 1, sont utilisés. Ces variables sont dérivées du modèle numérique de terrain à 25 m. Leurs transformations ont été effectuées par Broenimann, Randin, Zimmermann et Guisan (2003).

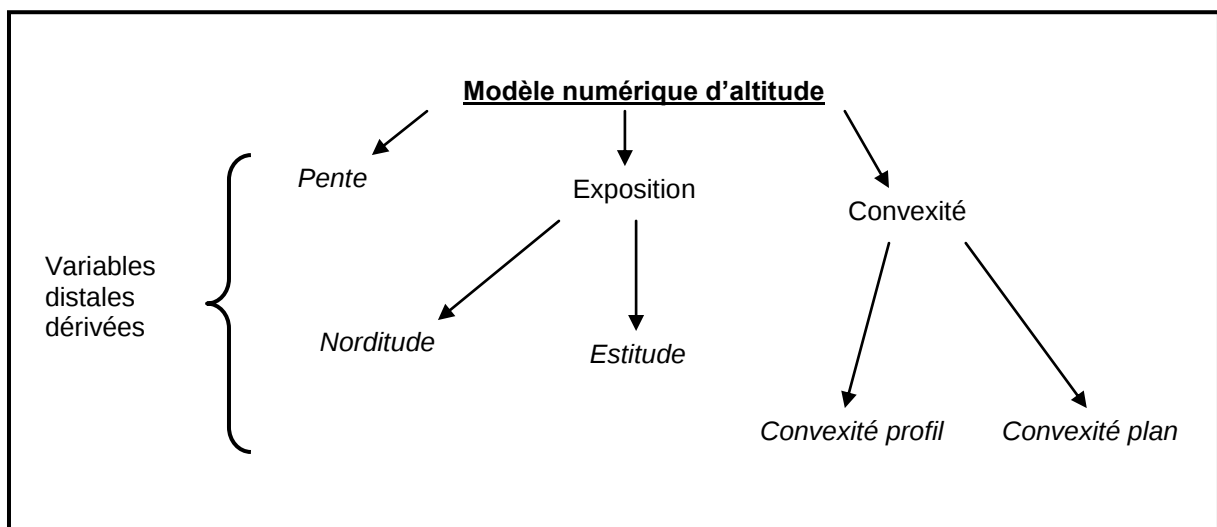


Figure 2 : Schéma des 5 variables distales utilisées. Ces variables sont dérivées d'un modèle numérique d'altitude. Dans notre recherche, ces derniers sont les modèles : Laser 5x5, Laser 9x9, Laser 15x15, Laser 25x25, Laser 51x51, MNA25 3x3, MNA25 5x5 et MNA25 7x7. A chaque fenêtre focale, la pente, la norditude, l'estitude, la convexité profil et la convexité plan sont calculés.

Table 1 : Prédicteurs climatiques utilisés dans les modèles prédictifs et repris du travail de diplôme de Roxane Milleret (2003).

Abréviation	Description
sraddy	daily average of global potential shortwave radiation per year
sfroyy	annual average 1961-1990 number of frost days during the growing season
twi25	topography wetness index
swb	annual average site water balance accounting for soil properties
taveyy	yearly average temperature

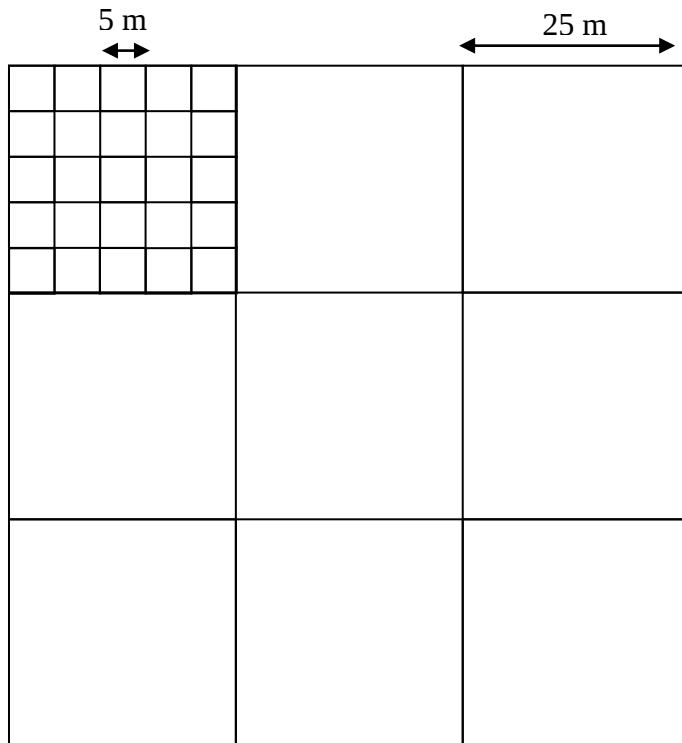


Figure 3 : Schéma de deux différentes résolutions utilisées dans ce travail (pris en exemple) : Laser 5x5 et MNA 3x3. Pour le MNA 3x3 : chaque pixel de 25 m de côté contient, par exemple, une valeur d'altitude. Pour le calcul des prédictors distaux à partir d'un MNT dans ArcINFO, le programme fait la moyenne de 3x3 pixels et attribue le résultat au pixel central. Ainsi pour le Laser 5x5, chaque pixel mesure 1,6m ($1,6 \times 3 = 5\text{m}$).

Analyses statistiques

Pour chacune des espèces étudiées, des GLMs (General Linear Model) (McCullagh & Nelder, 1989) sont effectuées avec tous les prédicteurs climatiques en ajoutant à chaque fois les prédicteurs topographiques à une des différentes fenêtres focales. Etant donné qu'il y a 8 fenêtres focales différentes, 8 GLMs par espèces sont calculées. Afin de déterminer les prédicteurs pertinents, la méthode « stepwise » est utilisée (Harrell, F.E & Lee, K.L, 1981).

Pour chaque GLM, les calculs sont automatisés par une fonction (appelée LFC) qui retourne la déviance de chaque prédicteur retenu et son coefficient, de même que la déviance et la déviance ajustée, l'AUC (Area Under the Curve), le coefficient de Gini (AUC') et le max Kappa (et le seuil de celui-ci).

À l'aide de ces données, pour chaque espèce, la fenêtre focale à laquelle la GLM explique la plus grande variance a été retenue. Ce résultat a été comparé aux groupes fonctionnels des espèces (Flora Helvetica, 2001) pour mettre en évidence une éventuelle relation entre eux.

Évaluation

Pour l'évaluation des modèles créés, 24 espèces ont été choisies, sur la base des déviances ajustées et des AUC de leurs modèles. De même deux fenêtres focales ont été sélectionnées : la première à une haute résolution (Laser 5x5) et la deuxième à la résolution couramment utilisée (MNA 3x3) (Milleret, 2004 et Guisan & al., 1998). Ce choix est basé sur une analyse en composantes principales (ACP) effectuée sur chaque prédicteur topographique à toutes les fenêtres focales et également sur les meilleurs scores des évaluations (validation croisée) obtenus pour tous les modèles. Ces contraintes ont été nécessaires afin d'alléger le travail et le rendre réalisable sur la durée lui étant dévolue. Un modèle numérique d'altitude Laser à une résolution de 1m (MNA Laser 1m.), gracieusement fourni par LASIG de l'EPFL (Laboratoire

de système d'Information Géographique), est disponible uniquement pour la région du vallon de Nant. Cette région est la base de notre validation afin de créer un jeu de donnée indépendant.

Deux modèles prédictifs ont été construits, grâce au programme ArcMAP, pour chaque espèce retenue (cf. annexe 4) : l'un en utilisant tous les prédicteurs à l'échelle MNA 25 et l'autre, à l'échelle Laser, d'où la nécessité de ramener les prédicteurs climatiques à 5 m (Fig. 4).

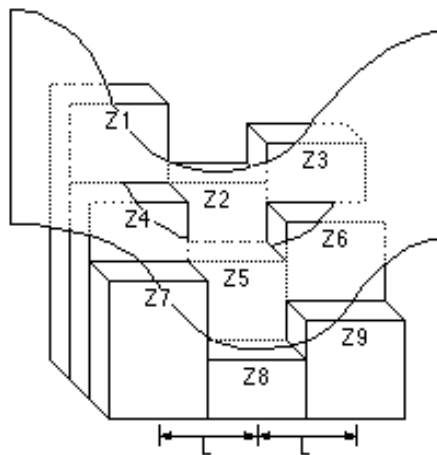


Figure 4 : Transformation des prédicteurs climatiques effectuée grâce au programme ArcInfo et basée sur la moyenne de trois grids (pixels). Z1, Z2, ... , Z9 : correspondent à 9 grid (3x3 pixels) d'une carte en mode raster.

Terrain

L'échantillonnage est aléatoire stratifié par les présences et les absences prédites par les modèles Laser 5x5 des espèces (échantillonnage multi-espèces). Dans le Vallon de Nant, certaines zones ont été exclues de l'échantillonnage : les forêts, les habitations, les routes, les chemins, les ruisseaux et les falaises (cartes du canton de Vaud, VECTOR25© YYYY swisstopo (DV012579)) avec une zone de 10 m. autour de celles-ci dans le but de diminuer l'erreur de cartographie et leurs influences respectives sur la végétation. Les points de MODIPLANT ayant déjà été effectués dans le Vallon de Nant, ont également été retirés de la zone d'échantillonnage avec une zone tampon de 25 m pour éviter l'autocorrélation spatiale entre les points de calibration et ceux d'évaluation (Annexe 5). Pour chaque espèce, 4 points de présence et 4 points d'absence, prédites par le modèle au Laser 5x5, ont été tiré au sort (184 points au total).

Sur le terrain, des relevés de 25m² ont été placés dans le sens de la pente, leurs centres étant les points issus de l'échantillonnage, repérés par un GPS (Global Positioning System). (Annexe 6). Dans ces derniers, les présences et les absences des 24 espèces retenues ont été constatées pour comparer les prédictions des deux différents modèles.

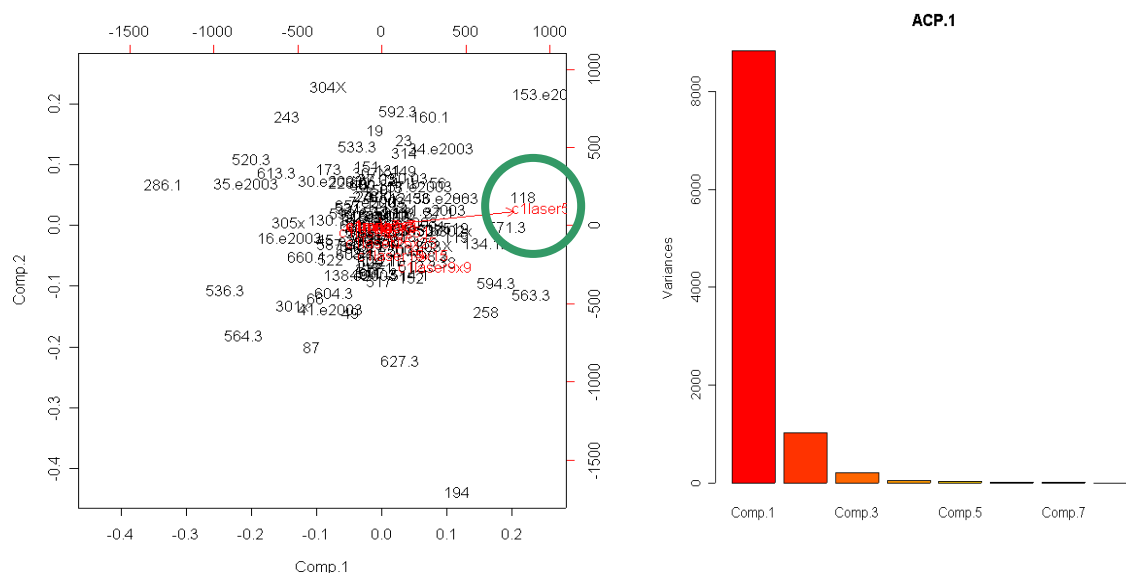
Enfin, à l'aide d'un langage de programmation de ArcInfo GIS (aml) (Annexe 7) les présences et absences de chaque espèce sont exportées des modèles prédictifs (MNA 25 et Laser 5x5) pour chaque relevé effectué. Cette étape a été faite dans le but de vérifier l'exactitude des deux différents modèles par comparaison avec les observations sur le terrain.

Résultats

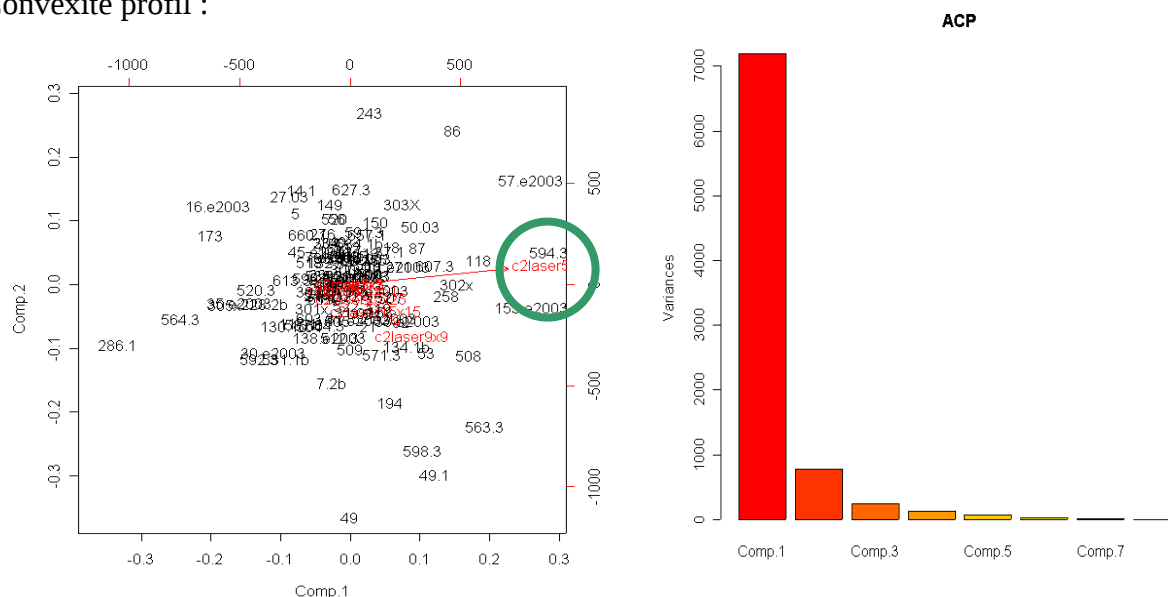
Des analyses en composantes principales (ACP) ont permis de déterminer quel type de fenêtre focale (MNA 25 ou MNA Laser) est plus pertinente pour chaque prédicteur topographique. Par l'observation des boxplots et des biplots des ACP (Annexe 8), les fenêtres focales, expliquant le plus de variance, sont déterminées. Pour les prédicteurs « pente » et « orientation » (estitude et norditude), la fenêtre focale la plus pertinente est difficile à identifier (MNA 7x7 pour pente ; MNA 3x3, Laser 15x15, Laser 25x25, Laser 51x51 pour l'estitude et la norditude). Par contre, dans le cas des « convexités plan et profil », une grande partie de la variance est attribuée à la fenêtre Laser 5x5 (Fig. 5), qui est par ailleurs la plus petite.

Figure 5 : Biplots et boxplots des analyses en composante principale (ACP) des prédicteurs topographiques « convexité plan » et « convexité profil ». Il est possible d'observer que dans les deux cas la plus grande partie de variance est expliquée par le modèle laser 5x5 (25m²).

Convexité plan :



Convexité profil :



Légende : c1 : convexité plan, c2 : convexité profil.

La comparaison des modèles avec les groupes fonctionnels n'a donné visuellement aucun résultat significatif (Annexe 1)

A l'aide des données obtenues à partir de la fonction LFC, les modèles avec les meilleures évaluations (D2, adjD2, AUC, AUC' et max Kappa) sont retenus (Annexe 9). La fenêtre qui obtient le plus fréquemment le meilleur score d'évaluation est celle du Laser 5x5 (Tab. 2).

Tableau 2 : Nombre de fois que chaque fenêtre a la meilleure évaluation. La fenêtre Laser 5x5 est clairement celle qui ressort le plus souvent.

fenêtre	D2	adjD2	AUC	AUC'
laser5x5	18	23	17	17
laser9x9	15	9	10	10
laser15x15	8	11	14	14
laser25x25	12	11	10	10
laser51x51	11	15	16	16
mna3x3	13	14	8	8
mna5x5	14	8	12	12
mna7x7	12	12	16	16

Légende : D2, déviance des modèles, adjD2, déviance ajustée des modèles, AUC, aire sous la courbe, AUC', coefficient de Gini, maxKappa, max Kappa.

Pour l'évaluation des modèles créés, 24 espèces ont été choisies, sur la base des déviations ajustées et des AUC de leurs modèles (Tab. 3).

Tableau 3 : Espèces retenues pour l'évaluation des modèles avec mentionné l'abréviation et le code attribué dans le Flora Helvetica (Lauber & Wagner, 2001).

Abréviation	Espèces	Flora Helv.
ARELA	<i>Arrhenatherum elatius</i>	2736
BAALP	<i>Bartsia alpina</i>	1822
BEPER	<i>Bellis perennis</i>	2037
CASCH	<i>Campanula scheuchzeri</i>	1907
CASEM	<i>Carex sempervirens</i>	2583
CYCRI	<i>Cynosurus cristatus</i>	2675
DAGLO	<i>Dactylis glomerata</i>	2674
FEPRA	<i>Festuca pratensis s.l.</i>	2621
GAALB	<i>Galium album</i>	1961
GAANI	<i>Galium anisophyllum</i>	1954
HOALP	<i>Homogyne alpina</i>	2156
LAPRA	<i>Lathyrus pratensis</i>	1229
LIMUT	<i>Ligusticum mutellina</i>	1471
NASTR	<i>Nardus stricta</i>	2724
PLLAN	<i>Plantago lanceolata</i>	1721
PLMED	<i>Plantago media</i>	1722
POALP	<i>Poa alpina</i>	2654
POTRI	<i>Poa trivialis s.str.</i>	2665
POVIV	<i>Polygonum viviparum</i>	460
RANMO	<i>Ranunculus montanus aggr.</i>	189
RUACE	<i>Rumex acetosa</i>	465
SOLAL	<i>Soldanella alpina</i>	837
VAGAU	<i>Vaccinium gaultherioides</i>	792
VEARV	<i>Veronica arvensis</i>	1797

Les données récoltées sur le terrain sont comparées aux prédictions des modèles MNA 25 et Laser 5x5 (Tab. 4).

Tableau 4 : Présences (1) et absences (0), des espèces retenues, prédites par le modèle Laser 5x5, par le modèle au 25 m (MNA 3x3) et celles des observations faites sur le terrain. Ce tableau n'est qu'un aperçu : il ne contient que les quatre premières espèces sélectionnées lors du terrain.

Relevés	ARELA			BAALP			BEPER			CASCH		
	pred5x5	pred25	obs	pred5x5	pred25	obs	pred5x5	pred25	obs	pred5x5	pred25	obs
Beper-0-2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0
Baalp-0-1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
Contrôle -1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Contrôle-2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Contrôle-3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
Beper-1-5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
Contrôle-4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Casem-0-4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Daglo-1-2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Beper-1-3	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Nastr-1-3	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
Gaani-0-2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Cycr-1-3	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Fepra-1-2	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
Gaani-1-4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
Baalp-1-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Vearv-1-5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ruace-1-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Potri-1-1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
Cycr-1-4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Contrôle1-ruace	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Vagau-1-4	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Vagau-1-3	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Contrôle-vagau	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Gaalb-1-5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
Fepra-1-3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Lapra-1-2	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
Fepra-1-1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
Contrôle2-ruace	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Légende : pred5x5, présences/absences prédites par le modèle Laser 5x5 ; pred25, présences /absences prédites par le modèle MNA 3x3 ; obs, présences/absences observées sur le terrain. Relevés : le premier numéro (1/0) correspond à la présence ou à l'absence de l'espèce focale ; le deuxième numéro (de 1 à 5) les distingue les uns des autres. Pour les abréviations des espèces cf. Tab. 3.

L'exactitude des prédictions se fait en comptant le nombre de fois où chaque modèle est vérifié ou non (Tab. 5). Les scores du modèle Laser 5x5 est légèrement plus élevé (116) que celui du modèle MNA 25 (105). Mais la différence ne peut être significative.

Tableau 5 : Evaluation des prédictions des modèles avec les observations sur le terrain avec leurs sommes respectives. Le score effectué par les prédictions faites avec le modèle Laser est légèrement supérieur à celui du modèle numérique d'altitude au 25 m.

	arela	baalp	casch	casem	cycr	daglo	fepra	gaalb	gaani	hoalp	lapra	nastr	plan	plmed	poalp	potri	poviv	ranmo	ruace	solal	vagau	total
somme des présences	4	9	17	14	4	17	6	8	16	9	3	2	12	9	8	1	15	16	2	13	4	189
laser	1	3	1	6	10	17	3	6	6	5	14	0	3	5	6	1	5	4	4	6	10	116
mna 25	0	8	2	9	1	5	1	8	3	13	1	4	1	1	4	13	7	0	15	7	2	105
laser et mna 25	25	16	17	10	16	7	22	14	13	6	12	23	18	18	16	8	10	8	7	12	16	294
aucun des deux	4	3	10	5	3	1	4	2	8	6	3	3	8	6	4	8	8	18	4	5	2	115

Légende : somme des présences, occurrence de la rencontre de chaque espèce sur le terrain ; laser, prédictions du modèle Laser vérifiées ; mna 25, prédictions du modèle MNA 3x3 vérifiées ; laser et mna 25, prédictions conjointement vérifiées ; aucun des deux, prédictions fausses pour les deux modèles. Pour les abréviations des espèces cf. Tab. 3.

Les pourcentages de prédictions exactes de chacun des modèles ne diffèrent à peine de 2 %. De même, nous ne pouvons pas affirmer la dominance du Laser.

Tableau 6 : Pourcentage de prédictions vérifiées par chacun des deux modèles. Le pourcentage obtenu par les prédictions faites avec le modèle Laser est légèrement supérieur à celui du modèle numérique d'altitude au 25 m.

	% prédictions vérifiées
laser 5x5	65.08
mna 3x3	63.33

Légende : laser 5x5, modèle Laser 5x5 ; mna 3x3, modèle MNA 25

Remarquons que l'importance de la microtopographie est proportionnelle à l'altitude (Dirnböck & al., 2003). Il est ainsi possible que pour les espèces alpines, les modèles au laser soient plus réalistes, c'est pour cela que nous avons regroupé les quatre espèces alpines. Les pourcentages des prédictions vérifiées sont de 63.3% pour le Laser 5x5 et de 55.5% pour le MNA 25.

Tableau 7 : Evaluation des prédictions des modèles avec les observations sur le terrain avec leurs sommes respectives pour les espèces essentiellement alpines (d'après le Flora Helvetica (Lauber & Wagner, 2001)). Le score effectué par les prédictions faites avec le modèle Laser est légèrement supérieur à celui du modèle numérique d'altitude au 25 m.

	baalp	gaani	ranmo	vagau	total
somme des présences	9	16	16	4	45
laser	3	6	4	10	23
mna 25	8	3	0	2	13
laser et mna 25	16	13	8	16	53
aucun des deux	3	8	18	2	31

Légende : somme des présences, occurrence de la rencontre de chaque espèce sur le terrain ; laser, prédictions du modèle Laser vérifiées ; mna 25, prédictions du modèle MNA 3x3 vérifiées ; laser et mna 25, prédictions conjointement vérifiées ; aucun des deux, prédictions fausses pour les deux modèles. Pour les abréviations des espèces cf. Tab. 3.

Avec les données obtenues lors de l'évaluation des prédictions, il est possible de construire des tables de contingences : 2 par espèces étant donné que chaque modèle est évalué (Tab. 8).

Tableau 8 : Tables de contingences de deux espèces : *Cynosorus cristatus* et *Dactylis glomerata*. Pour chaque espèce, les deux modèles de terrain sont évalués.

CYCRI			DAGLO		
laser	obs 1	obs 0	laser	obs 1	obs 0
prédit 1	3	3	prédit 1	16	5
prédit 0	1	22	prédit 0	1	7

mnt	obs 1	obs 0	mnt	obs 1	obs 0
prédit 1	4	12	prédit 1	0	0
prédit 0	0	13	prédit 0	17	12

Légende : CYCRI, *Cynosorus cristatus*; DAGLO, *Dactylis glomerata*; obs, présence ou absence observée sur le terrain ; prédit, présence et absences préditent par la carte prédictive Laser 1m. et par celle du MNT 25m.

A partir des tables de contingences, il est possible de calculer le coefficient Kappa pour chacune d'elles (Tab. 9). Ce coefficient calcule l'adéquation qui pourrait être obtenue par « chance » si les lignes étaient indépendantes des colonnes. Nos valeurs de Kappa sont comprises entre 0 et 1 : la valeur 1 correspond à une prédiction parfaite et la valeur 0 à une prédiction qui pourrait être obtenue au hasard ; des valeurs négatives peuvent apparaître, dans ce cas le modèle prédit que des erreurs. Dans le tableau 9, la moyenne des Kappas est légèrement supérieure pour les prédictions aux modèles Laser 5x5 (0.229) que pour les modèles MNA25 (0.175).

Tableau 9 : Calcul des Kappas des différentes espèces à chaque résolution retenue pour la validation sur le terrain. La moyenne des Kappas est légèrement supérieure pour les prédictions aux modèles Laser. Par contre, 9 modèles de chaque résolutions sont retenus par comparaison des Kappa : égalité parfaite.

KAPPA	Laser	MNA25	Modèle
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0.000	0.000	nul
<i>Bartsia alpina</i>	0.270	0.631	MNT 25m
<i>Campanula scheuchzeri</i>	0.263	0.338	MNT 25m
<i>Carex sempervirens</i>	0.015	0.319	MNT 25m
<i>Cynosurus cristatus</i>	0.521	0.230	Laser 1m
<i>Dactylis glomerata</i>	0.552	0.000	Laser 1m
<i>Festuca pratensis s.l.</i>	0.356	0.000	Laser 1m
<i>Galium album</i>	0.300	0.171	Laser 1m
<i>Galium anisophyllum</i>	0.249	0.137	Laser 1m
<i>Homogyne alpina</i>	0.065	0.194	MNT 25m
<i>Lathyrus pratensis</i>	0.256	0.029	Laser 1m
<i>Plantago lanceolata</i>	0.300	0.190	Laser 1m
<i>Plantago media</i>	0.334	-0.066	Laser 1m
<i>Poa alpina</i>	0.065	0.192	MNT 25m
<i>Poa trivialis s.str.</i>	0.027	0.147	MNT 25m
<i>Polygonum viviparum</i>	0.024	0.155	MNT 25m
<i>Rumex acetosa</i>	-0.028	0.129	MNT 25m
<i>Soldanella alpina</i>	0.270	0.271	MNT 25m
<i>Vaccinium gaultherioides</i>	0.514	0.260	Laser 1m
Moyenne Kappa	0.229	0.175	

Légende : Modèle, modèle retenu ayant un meilleur Kappa.

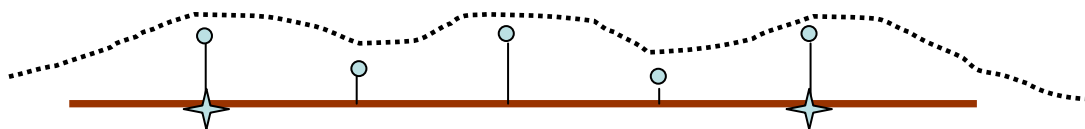
Discussion

Les résultats obtenus nous permettent d'affirmer que le modèle Laser n'apporte pas significativement une amélioration dans la modélisation d'espèces végétales, malgré un pourcentage de prédictions vérifiées légèrement supérieur. En effet le modèle au 1 m n'a pas prédit significativement mieux la présence et l'absence des espèces, que le modèle au 25m. Même la séparation des espèces alpines, supposées répondre mieux, parce que plus sensibles aux microreliefs, ne suggère qu'une petite amélioration de la part du modèle Laser. Les valeurs moyenne de Kappa (Tab. 9), révèlent une différence minime entre les deux modèles numérique : Laser 5x5 et MNA 25. Par contre, un nombre identique de modèles de chaque résolution est retenu par comparaison des Kappa. Une fois de plus, nos analyses ne révèlent pas une dominance d'un modèle. De même que pour les pourcentages de prédictions, le regroupement des espèces alpines n'ajoute rien à nos résultats. Il faut tout de même remarquer que le modèle d'altitude s'arrête à 2100m. Nous pourrions supposer que au-delà de cette limite, la microtopographie aurait un pouvoir prédictif supérieur.

Une des raisons expliquant cette infime différence entre les deux résolutions a été mise en évidence pendant la phase d'évaluation. Le modèle Laser doit être constamment remis à jour car le relief a une structure dynamique. Effectivement, les éboulements, les glissements de terrain et les ruissellements modifient la topographie. Ceci est nettement remarquable dans le Vallon de Nant où les précipitations sont fréquentes. Cet aspect dynamique peut également être remarqué dans les zones alluviales et dans l'avancement des forêts et des verges (aulnaies vertes) vu que la taille du cheptel de la région a diminué de moitié en une année. Pour cette raison, certains relevés échantillonnés ont dû être déplacés de quelques mètres.

Une autre hypothèse pour expliquer les résultats obtenus se base sur les bruits engendrés par les erreurs attribués à chaque modèle. L'erreur estimée pour le modèle au 1 m (en générale sur la coordonnée Z) est en moyenne de 20 cm. Cependant dans certains endroits il peut y avoir des accumulations d'erreurs (dû par exemple à la mauvaise réflexion du sol, ou au climat du jour de la mesure). Ainsi le modèle peut détecter un microreliefs (creux ou bosses) n'existant pas en réalité. Par contre dans ces cas le modèle au 25m, ayant les points plus écartés, faire donc une meilleure prédiction, car il ne localise que la présence réaliste d'un plat (Fig. 6).

Figure 5 : schéma expliquant les possibles erreurs engendrées par les différents modèles. Si plusieurs erreurs sont accumulés dans une zone le modèle laser au 1m peut localiser des bosses ou creux inexistant



Légende: ✨ : points détecté avec le modèle numérique à une résolution de 25m, ● : points détecté avec un modèle numérique à une résolution de 1m. Ligne trait tillée: relief obtenue par le modèle Laser. Ligne grosse: aspect réel du sol, c'est-à-dire un plat.

De plus dans le but de compléter ce travail, il est important de tenir compte des recherches effectuées sur la géomorphologie et l'exploitation ou l'utilisation des terrains pour l'élevage (travaux de semestre effectués par Spahr S. et Vuissoz G. pour la Géomorphologie et Humbert J.-Y. pour l'utilisation des sols en 2004 dans le cursus du module de Botanique).

Quelques exemples mettent en évidence ces deux lacunes : zones d'éboulis qui exclue compétitivement certaines espèces (Photo 1) et l'effet du pâturage qui se fait nettement remarquer (Photo 2). Il faut constater que l'effet sur la végétation change selon le type de brouteur : les moutons et les chèvres arrachent les plantes alors que les bovins la coupe. Un autre aspect important omis, qui pourrait être le type de sol (cf. Commentaires photo 3), modifie radicalement le cortège floristique (*Ortica dioica* sans *Cynosurus cristatus* vs *Veratrum album* avec *Cynosurus cristatus*) (Photo 3).

Photo 1 : Photo illustrant une différence notable non détectée par nos modèles (la géomorphologie) : une zone d'éboulis à l'arrière plan et une butte où s'est installée une pelouse alpine. Remarquons que ces deux pentes sont identiques et de même exposition. Photo prise en dessous de « Les Creux » situé vers le « Col des Perris Blancs ».



Photo 2 : Photo illustrant l'effet du pâturage. Même si une légère différence dans l'exposition peut être décelée, un tel phénomène change radicalement le cortège floristique de chaque côté de la clôture,. Il peut également rendre la détermination plus difficile étant donné que les espèces ne sont pas ou plus en fleurs. Cette photo a été prise dans la région de « Le Botsa » situé au nord de « Le Richard » où se pâturent des moutons et des chèvres.



Photo 3 : Photo illustrant un important changement de la végétation. A l'arrière plan (devant la forêt) se trouve un pâturage parsemé de patches de *Ortica dioica* et où *Cynosurus cristatus* est absente. En revanche, au premier plan, nous pouvons observer un pâturage où *Veratrum album* s'y trouve en abondance et dans lequel la présence de *Cynosurus cristatus* a pu être constatée. Nous pouvons tout de même remarquer une légère différence de pente qui pourrait avoir un effet sur le temps d'accumulation de neige et ainsi sur la période de croissance. Les modèles devraient détecter un tel changement puisqu'ils sont basés sur des variables topographiques. Une hypothèse qui pourrait expliquer cette constatation : types de sols différents. Cette photo a été prise sur la rive gauche du Vallon de Nant au niveau de Nant.



Un échantillonnage suffisamment large a été effectué étant donné que de nombreux points tirés aléatoirement se sont retrouvés dans des endroits non accessibles (exemple : point entouré de falaises). Le choix des relevés à effectuer s'est également basé sur l'occurrence des espèces rencontrées au fur et à mesure de notre évaluation : si dans les premiers relevés choisis, une espèce est absente à plusieurs reprises, les points d'absence issus de l'échantillonnage pour l'espèce en question, n'ont pas été retenus. Raison pour laquelle, la plupart des relevés effectués sont des points issus de l'échantillonnage de présence des espèces. Les relevés « Contrôle » consistent en des points ne faisant pas partie de l'échantillonnage mais représentant des situations topographiques particulièrement évidentes : microvallons (creux), microcollines (bosses). Les relevés « Contrôle – VAGAU » et « Contrôle – RUACE » sont également des points non-échantillonnés ; *Vaccinium gaultherioides* et *Rumex acetosa* n'ayant pas eut suffisamment de présence lors de la campagne de terrain.

Pour les analyses finales, c'est-à-dire le comptage de prédictions vérifiées pour chaque modèle, nous avons décidé de retirer trois espèces. La première, *Ligusticum mutellina*, possédait que des points d'échantillonnage inaccessibles. De plus sa détermination était hasardeuse étant donné que elle ne se trouvait pas en fleur et que la distinction, du point de vue végétatif, avec *Ligusticum mutellinoides* est difficile. La seconde, *Veronica arvensis*, n'a jamais été observée pendant le terrain. La troisième, *Bellis perrenis*, a été écartée dû à un polymorphisme des feuilles. Cette dernière peut être facilement confondue avec *Leucanthemum*. Pour cette raison, le choix des espèces aurait pu être basé sur d'autres critères comme la phénologie des espèces. Effectivement, sur le terrain, la détermination a été difficile pour certaines espèces pour lesquelles seules les feuilles étaient présentes (polymorphisme des parties végétatives) (exemple : *Bellis perennis*).

Deux remarques pouvant expliquer nos résultats concernent le modèle Laser. Premièrement, la taille des relevés de 25 m² sur le terrain, correspond aux unités de prédictions des modèles de fenêtres focales 5x5 utilisées pour l'échantillonnage. Cette grandeur de fenêtre pourrait induire une marge d'erreur prouvée sur le terrain. À l'aide d'un GPS, il est difficile de tomber exactement au cm près sur le point d'échantillonnage. En effet, le centre de nos relevés s'est souvent trouvé à une distance moyenne de 5 m du point prévu. A une si haute résolution, ce petit écart peut prendre une importance notable. Sur le terrain, il nous est arrivé de trouver une espèce juste à côté du carré et pas à l'intérieur. De plus, à certains endroits et certaines périodes de la journée, le nombre et la position des satellites ne permettaient pas une haute précision du GPS. Deuxièmement, l'exactitude des prédictions du modèle Laser crée des petits patches (ou pixels) de présence isolés d'une espèce qui ne peut pas forcément y accéder vu sa stratégie de dispersion. Dans cette optique le Laser peut avoir un grand intérêt pour les plantes rares dans le but de trouver des habitats potentiels.

Un dernier fait remarquable dans l'analyse des résultats ne doit pas être négligé. Nous avons effectué notre première campagne de terrain. Il y a donc eu un apprentissage au fur et à mesure de l'avancement de l'échantillonnage et un biais aurait pu en résulter. De plus, afin d'agrandir le nombre de relevés et d'augmenter ainsi la puissance de nos analyses le temps passé sur le terrain aurait dû être plus long. En effet, le nombre de relevés effectués sur deux semaines (30) est juste suffisant.

Enfin il serait intéressant d'effectuer des analyses ultérieures comme par exemple regrouper les espèces selon leur amplitude altitudinale. Effectivement, la microtopographie devient plus importante en altitude car la végétation est plus basse. La création d'une matrice de coinertie

(MOI) (Dolédec S., 2000), pour déterminer quelles variables expliquent le mieux la distribution de chaque espèce, aurait pu être une autre approche à réaliser lors d'études futures. Afin de rester plus rigoureux dans la création de nos modèles à haute résolution, il faudrait utiliser des variables climatiques plus précises. Cette lacune pourra être comblée lors de l'aboutissement de la thèse de Christophe Randin au département d'écologie et d'évolution.

Remerciements

Un grand merci à Christophe Randin pour tout le travail accompli, à Antoine Guisan, pour ces conseils pertinents, à Thomas Czäka, pour ces conseils en informatique et à Robin Engler, pour sa patience.

Références

Box, E.O., (1981), *Macroclimate and Plant Forms : An Introduction to Predictive Modelling in Phytogeography*, Junk, The Hague, 258 pp.

Broennimann O., Randin C., Zimmermann N.E. et Guisan A., Swiss Eco-Climatic Gis data, 2003

Broennimann, O., (2003), Modéliser la distribution potentielle des espèces végétales rares et menacées, Travail de diplôme, Université de Lausanne.

Brown, D.G., (1994), *Predicting vegetation types at treelines using topography and biophysical disturbance variables*. J. Veg. Sci., 5 : 641-656.

Brzeziecki, B., Kienast, F. & Wildi, O., (1993), *A simulated map of the potential natural forest vegetation of Switzerland*, Journal of Vegetation Science, 4 (4): 499-508.

Dirnböck, T., Dullinger, S., Gottfried, M., Ginzler, C. & Grabherr, G., (2003), *Mapping alpine vegetation based on image analysis, topographic variables and Canonical Correspondence Analysis*, Applied Vegetation Sciences 6 : 85-96.

Dolédec, S. & al., (2000), Niche separation in community analysis : a new method, Ecology, 81 (10), p. 2914 – 2927.

Guisan, A. & al., (1998), *Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment*, Journal of Vegetation Science, 9, p. 65- 74.

Guisan, A. & J.-P. Theurillat, (2001), *Assessing alpine plant vulnerability to climate change : A modelling perspective*. Integrated Assessment, 1, p.307 – 320.

Guisan, A. & Hofer, U., (1993), Predicting reptile distributions at mesoscale : relation to climate and topography, J. Biogeogr. 30 (8): 1233-1243.

Harrell, F.E & Lee, K.L, (1981), *A stepwise variable selection procedure for non-linear regression-models*, Biometrics, 37 (3): p. 595-595.

Huntley, B., Berry, P.M., Cramer, W. & McDonald, A.P., (1995), *Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surfaces*, J. Biogeogr. 22 : 967-1001.

Lauber, K. & Wagner, G. (2001), *Flora Helvetica*, 2e edition.

McCullagh, P. & Nelder, J.A. (1989). *Generalized Linear Models*. Chapman & Hall, London.

Neilson, R.P., (1995), *A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance*, Ecol. Appl., 5 : 362-385.

Roxane Milleret, Travail de diplôme, *What will be the fate of plant species in a climate warming scenario by 2100? A spatial simulation study*. (2003)

Zimmermann, K. & Kienast, F., (1995), *Das Klima lässt sich nicht kartieren – Klimakarten werden gerechnet*. Informationsblatt des Forschungsbereiches Landschaftsökologie, Eidg., Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 27, p. 1-4.

Annexes

Herbier disponible auprès de Mi & Flo

Annexe 1: Liste des espèces avec des données de taille, de type écologique, des indices de Lindholt (humidité, éléments nutritifs, lumière) (tiré du Flora Helvetica, Lauber & Wagner, 2001) et la fenêtre dans laquelle la GLM a donné le meilleur score. Les espèces sont triées par le type biologique. Après analyse exploratoire, nous constatons aucune relation entre la fenêtre maximale et les divers données dans le tableau.

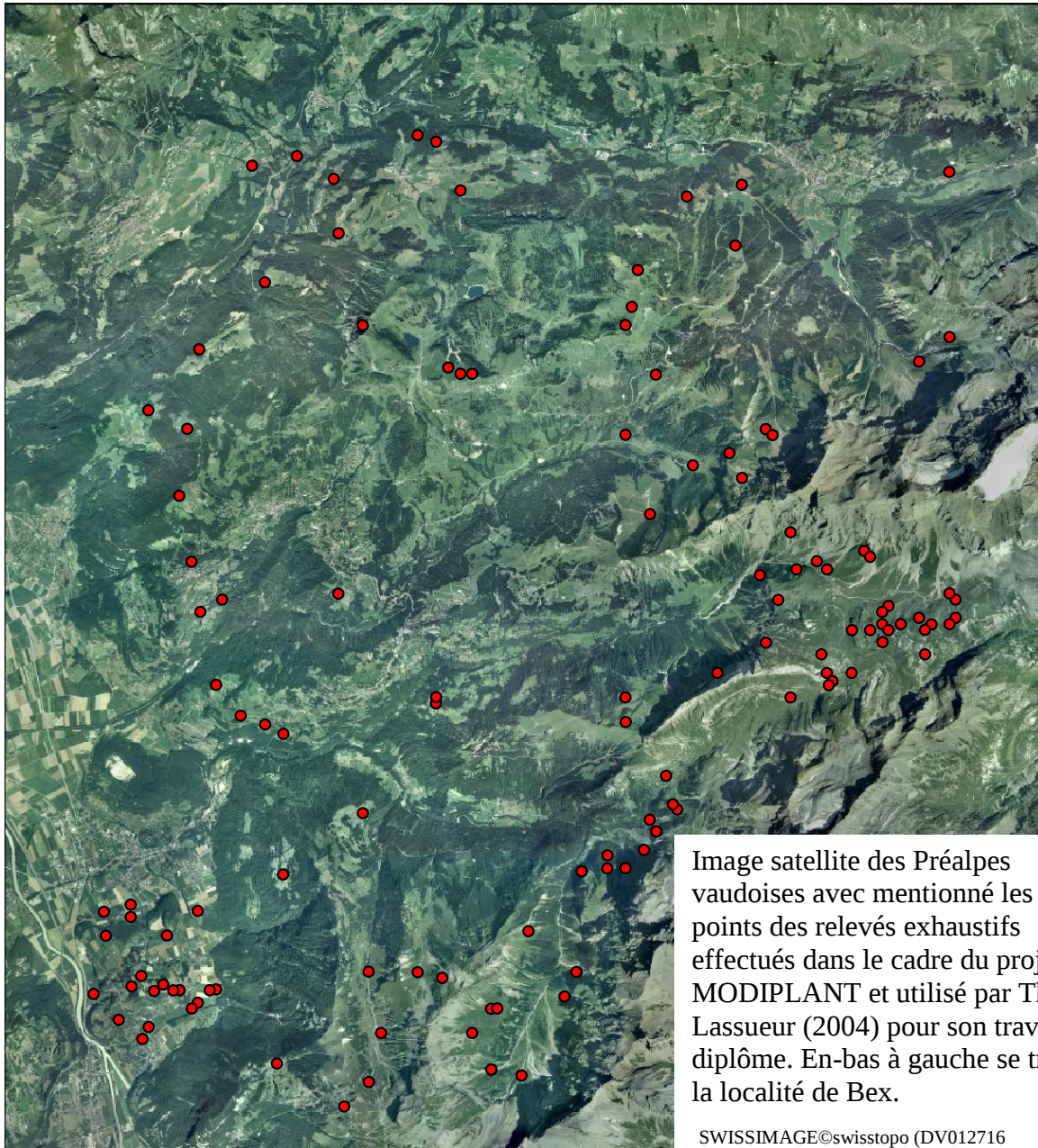
Abrév.	Nom	Num	Min	Max	Ecol	Biol	Hum	Nutrit	Lux	maxFENETRE
CECAE	Cerastium fontanum subsp. vulgare	103800	10	40	R	c	3	3	3	laser25x25
HICOM	Hippocrepis comosa	206300	10	20	S	c	2	2	4	mna5x5
SESEL	Selaginella selaginoides	386300	0	0	M	c	3	2	3	laser9x9
THPUL	Thymus pulegioides s.str.	421000	8	25	S	c	2	2	4	mna5x5
CRALB	Crocus albiflorus	125800	5	15	M	g	3	4	4	laser15x15
VECHA	Veronica chamaedrys	441400	10	30	G	g	3	4	3	mna7x7
BAALP	Bartsia alpina	58700	10	20	M	g,sp	4hv	3	3	laser15x15
LAPRA	Lathyrus pratensis	230400	30	90	G	g,vo	3	3	3	laser25x25
ACMIL	Achillea millefolium L.	1700	15	60	G	h	2	3	4	laser5x5
AGTEN	Agrostis capillaris	8600	20	60	G	h	3	2	3	laser15x15
AJREP	Ajuga reptans	10400	10	30	G	h	3	3	3	laser51x51
ALCON	Alchemilla conjuncta aggr.	12000	10	30	M	h	3	2	4	laser51x51
ALCXA	Alchemilla xanthochlora aggr.	21400	30	60	G	h	3,4	4	3	mna7x7
ALGLA	Alchemilla glabra aggr.	15000	10	50	G,M	h	4hv,4	3,4	3,4	laser5x5
ANTOD	Anthoxanthum odoratum aggr.	35500	20	50	G	h	3	3	4	laser5x5
ANTVL	Anthyllis vulneraria s.l.	36790	15	40	S,M	h	1,2	2,3	3,4,5	mna3x3
ARELA	Arrhenatherum elatius	45900	50	120 (150)	G	h	3	4	3	laser15x15
ASMAJ	Astrantia major	55200	30	90	M	h	3	3	3	mna7x7
BEMIC	Aster bellidiastrum	52000	5	25	M	h	3hv	2	3	mna7x7
BEPER	Bellis perennis	59100	5	15	G	h	3	4	4	laser51x51
BRERE	Bromus erectus s.str.	65700	30	100	S	h	2	2	4	mna3x3
BRMED	Briza media	65200	20	50 (90)	S	h	2hv	2	4	mna3x3
CADEF	Carduus defloratus s.str.	81600	10	50 (90)	M	h	2	3	4	laser15x15
CARHO	Campanula rhomboidalis	77000	20	60	M	h	3	4	4	laser15x15
CARPA	Carex pallescens	91600	20	50	G	h	3hv	3	3	mna3x3
CASCH	Campanula scheuchzeri	77200	10	40	M	h	3	3	4	mna5x5
CASEM	Carex sempervirens	93900	20	40	M	h	2	2	4	laser5x5
CASIM	Carlina acaulis subsp. caulescens	96000	3	30	M	h	2	2	4	mna5x5
CEJAC	Centaurea jacea s.str.	98800	10	60	G	h	3	3	4	mna5x5
CHAHl	Chaerophyllum hirsutum aggr.	106705	30	100	M,G	h	3hv,4	3,4	3	laser5x5
CHPRA	Leucanthemum vulgare aggr.	236900	10	80,30	G,M	h	3,3hv	3,2	4,3	mna7x7
CRAUR	Crepis aurea	123000	5	30	M	h	3	4	4	laser15x15
CRBLA	Crepis pyrenaica	124800	20	60	M	h	4	4	3	mna5x5
CYCRI	Cynosurus cristatus	129400	20	60	G	h	3	3	4	laser9x9
DAGLO	Dactylis glomerata	131800	30	120	G	h	3	4	3	mna3x3
DECAE	Deschampsia caespitosa	134800	30	100 (150)	H	h	4hv	4	3	laser5x5
EUCYP	Euphorbia cyparissias	159800	15	50	S	h	2	2	4	laser5x5
FEPRa	Festuca pratensis s.l.	169100	30	120	G	h	3	4	4	laser25x25
FERUB	Festuca rubra aggr.	170200	30	100	G	h	3	3	4	laser51x51
GAALB	Galium album	177400	30	150	F	h	3	4	3	mna7x7
GAANI	Galium anisophyllum	177500	5	20	M	h	2	2	4	laser9x9
GESIL	Geranium sylvaticum	189300	30	60	M	h	3	4	3	laser15x15
HEPUB	Helictotrichon pubescens	196800	30	120	G	h	2	3	4	laser5x5

HERSP	Heracleum sphondylium s.l.	198595	50	150	G,M	h	3	4	3,4	laser5x5
HIAUR	Hieracium lactucella	202100	5	30	S	h	3hv	2	4	laser9x9
HIBIF	Hieracium bifidum aggr.	200600	20	40	M	h	2	2	4	laser51x51
HOALP	Homogyne alpina	207300	10	30	M	h	3	2	3	laser25x25
HOLAN	Holcus lanatus	206800	30	80	G	h	3hv	3	4	laser51x51
HYMAC	Hypericum maculatum s.str.	210700	30	70	H	h	4hv	4	3	mna5x5
KNARV	Knautia arvensis	221400	30	100	G	h	2	3	4	mna7x7
KNSIL	Knautia dipsacifolia s.str.	221500	20	100	F	h	3	3	3	laser9x9
LEOHA	Leontodon hispidus s.l.	233000	10	60	G,M	h	3,3hv	3	4	mna3x3
LIMUT	Ligusticum mutellina	237800	10	20 (50)	M	h	3	3	4	laser5x5
LOCOR	Lotus corniculatus	244400	10	30	G	h	2	3	4	laser5x5
LOPER	Lolium perenne	242800	20	70	G	h	3hv	4	4	mna3x3
NASTR	Nardus stricta	269700	10	30	M	h	3	2	4	laser15x15
PHAPI	Phleum alpinum aggr.	298900	10	50	M	h	3	4	4	laser5x5
PHORB	Phyteuma orbiculare	301800	10	40	M	h	3hv	2	4	mna3x3
PIMAJ	Pimpinella major	303800	40	90	G	h	3	4	3	laser9x9
PLALP	Plantago alpina	307000	5	15	M	h	3	2	4	laser5x5
PLATR	Plantago atrata s.str.	307300	3	12	M	h	3	4	4	laser15x15
PLLAN	Plantago lanceolata	307800	10	40	G	h	2	3	4	mna3x3
PLMED	Plantago media	308100	20	40	S	h	2	2	4	laser51x51
POALP	Poa alpina	309000	10	40	M	h	3	4	4	laser25x25
POAUR	Potentilla aurea	321300	5	20	M	h	3	2	4	laser5x5
POCRA	Potentilla crantzii	322100	5	20	M	h	2	2	4	laser51x51
POERE	Potentilla erecta	322400	15	60	H	h	3hv	2	4	laser25x25
POPRA	Poa pratensis	310800	20	100	G	h	3	4	4	laser51x51
POTRI	Poa trivialis s.str.	311300	30	120	G	h	3hv	4	3	mna3x3
POVIV	Polygonum viviparum	315800	5	25	M	h	3	2	4	laser51x51
PRIVE	Primula veris s.l.	327195	10	30	S,F	h	3hv, 2	2	4, 3	laser25x25
PRVUL	Prunella vulgaris	328100	5	20 (30)	G	h	3	3	4	laser5x5
PUALP	Pulsatilla alpina s.str.	333200	20	50	M	h	3	3	4	laser51x51
RABUL	Ranunculus bulbosus	337700	10	50	S	h	2	2	4	mna7x7
RANAA	Ranunculus acris s.l.	336595	30	100	M,G	h	3hv,3	3, 4	3	mna7x7
RANEM	Ranunculus nemorosus aggr.	339605	10	100	F	h	3,3hv	2, 3, 4	3, 2	laser5x5
RANMO	Ranunculus montanus aggr.	339505	5	40	M	h	2,3,3hv	2, 3, 4	4, 3	laser5x5
RUACE	Rumex acetosa	358900	30	100	G	h	3	3	4	laser15x15
SAMIN	Sanguisorba minor s.str.	368700	20	50	S	h	2	2	4	mna5x5
SCLUC	Scabiosa lucida	377100	10	30	M	h	2	2	4	mna3x3
SECOE	Sesleria caerulea	392200	10	50	M	h	2	2	4	laser25x25
SOLAL	Soldanella alpina	400600	5	15	M	h	4	3	4	laser5x5
TREUR	Trollius europaeus	430600	10	50 (60)	H	h	4hv	3	4	mna7x7
TRFLA	Trisetum flavescens	429400	30	80	G	h	3	4	4	laser51x51
TRIIR	Trifolium repens s.str.	427200	0	0	G	h	3hv	4	4	mna3x3
TRORI	Tragopogon pratensis subsp. orientalis	423300	30	70	G	h	2	3	4	mna5x5
TRPRA	Trifolium pratense s.str.	426900	15	40	G	h	3	3	3	laser15x15
VERLO	Veratrum album subsp. lobelianum	438000	60	150	M	h	4	4	4	laser5x5
SILVU	Silene vulgaris s.l.	397295	10	30, 50	S,M	h,g	2	2	3, 5	mna3x3
THEAL	Thesium alpinum	417200	10	50	M	h,sp	3hv	2	4	laser25x25
VICRA	Vicia cracca s.str.	445000	20	120	G	h,vo	3hv	3	4	laser25x25
VISEP	Vicia sepium	447400	30	60	G	h,vo	3	3	3	laser5x5
RHALE	Rhinanthus alectorolophus	344100	10	50	H	t,sp	3hv	3	4	mna7x7
EUMIN	Euphrasia minima	162800	2	10 (25)	M	t,sp	3	2	4	laser15x15
CACAR	Carum carvi	97100	30	60	G	u	3	3	4	laser25x25
GENCA	Gentiana campestris s.str.	183200	5	20	M	u	4hv	2	4	mna3x3
LICAT	Linum catharticum	241100	5	30	H	u	3hv	1	3	laser25x25

MELUP	Medicago lupulina	255300	10	30 (70)	G	u	2	3	3	mna7x7
HELNU	Helianthemum nummularium s.l.	194895	10	40	S,M	z	1,2	2	4,5	laser51x51
SALRE	Salix retusa	366200	0	0	M	z	3	3	5	laser51x51
THAPG	Thymus praecox subsp. polytrichus	420900	3	10	M	z	2	2	4	mna3x3
VAMYR	Vaccinium myrtillus	434800	0	50	F	z	3	2	2	laser51x51

Légende : Abrév., Abréviation de l'espèce ; Num, numéro de l'espèce ; Min, taille minimale ; Max, taille maximale ; Ecol, type écologique ; Biol, type biologique ; Hum, indice d'humidité ; Nutrit, indice de substances nutritives ; Lux, indice de lumière (indices de Lindholt) ; maxFENETRE, fenêtre dans laquelle la GLM (effectuée à toutes les fenêtres : Laser 5x5, Laser 9x9, Laser 15x15, Laser 25x25, Laser 51x51, MNA25 3x3, MNA25 5x5, MNA25 7x7) a donné le meilleur score.

Annexe 2 :

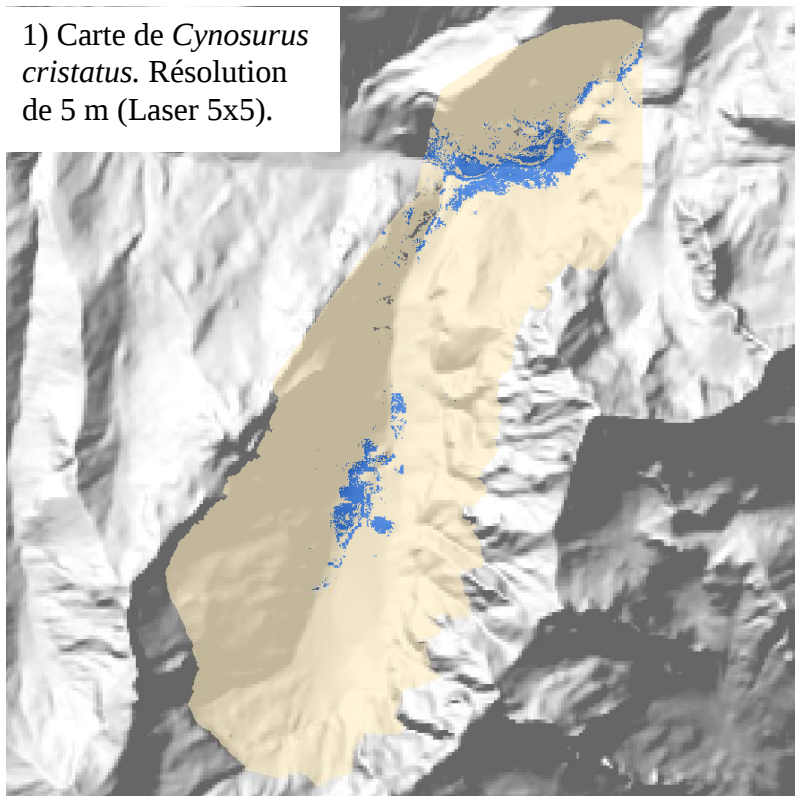


Annexe 3: Transformations de l'orientation en estitude et en norditude dans ArcMAP.
L'orientation a été obtenue par la fonction « courbure » disponible dans ArcINFO.

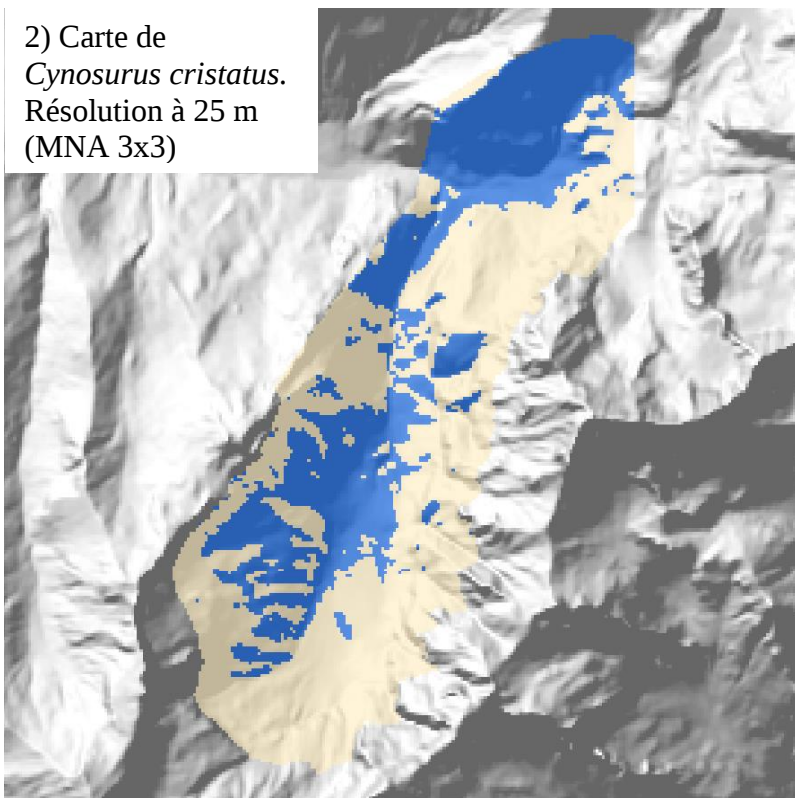
$estitude = \sin\left(\frac{orientation \cdot \pi}{180}\right)$	&	$norditude = \cos\left(\frac{orientation \cdot \pi}{180}\right)$
---	---	--

Annexe 4 : Cartes de distribution potentielle de quatre espèces prises en considération lors de l'évaluation. Il y a les exemples pour les deux types de résolution, laser 5x5 et MNA 3x3.

1) Carte de *Cynosurus cristatus*. Résolution de 5 m (Laser 5x5).

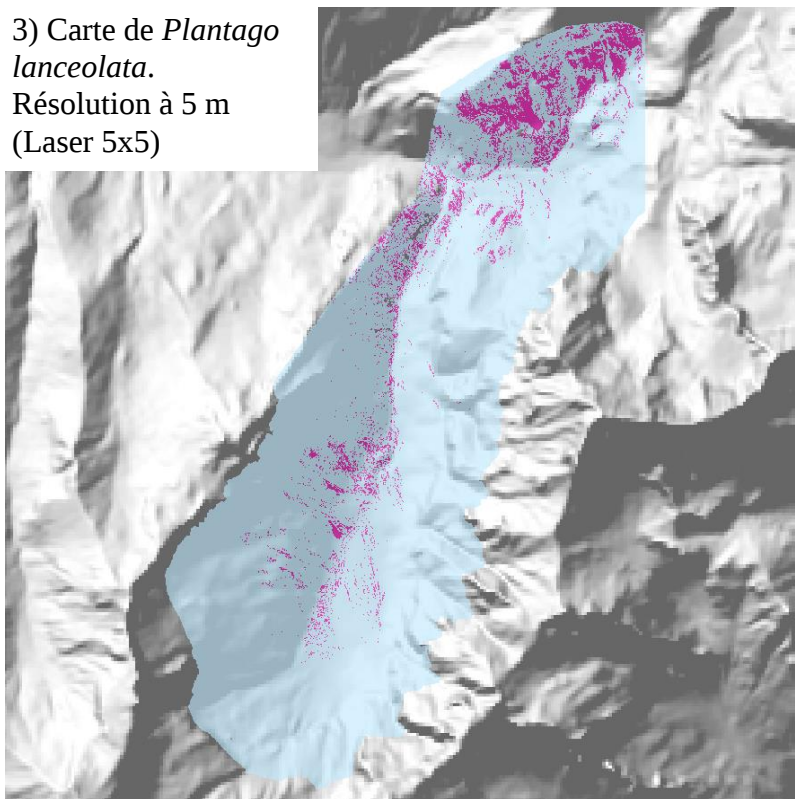


2) Carte de *Cynosurus cristatus*. Résolution à 25 m (MNA 3x3)

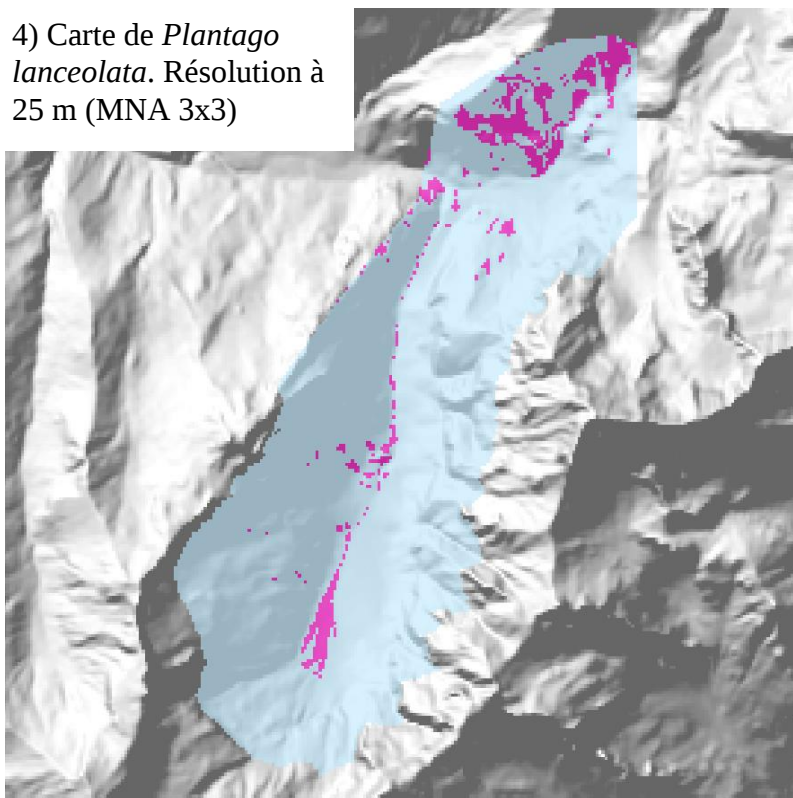


0 0.5 1 2 km 1:50'000

3) Carte de *Plantago lanceolata*.
Résolution à 5 m
(Laser 5x5)

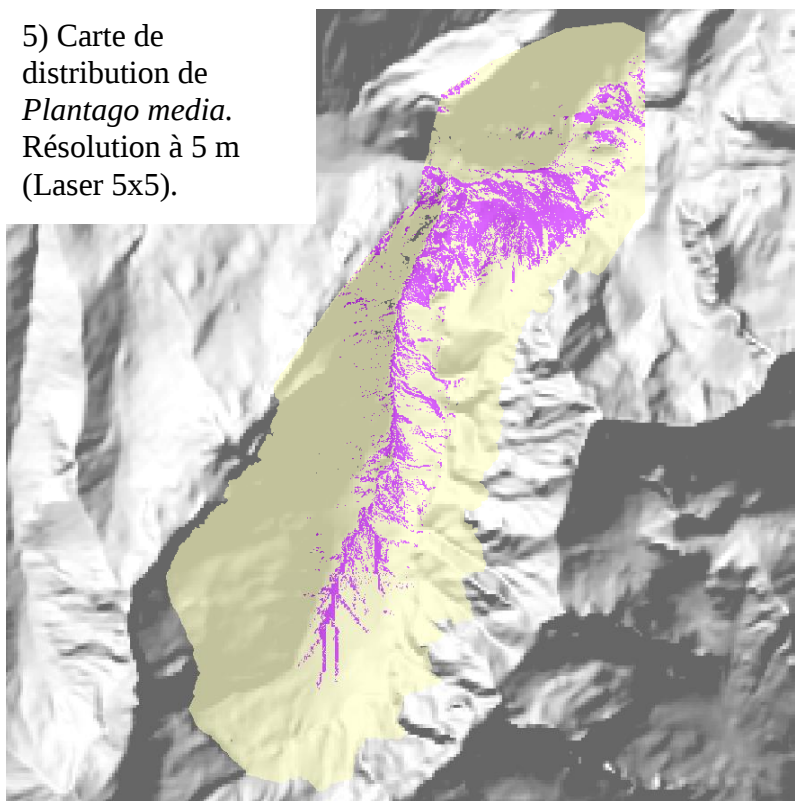


4) Carte de *Plantago lanceolata*. Résolution à 25 m (MNA 3x3)

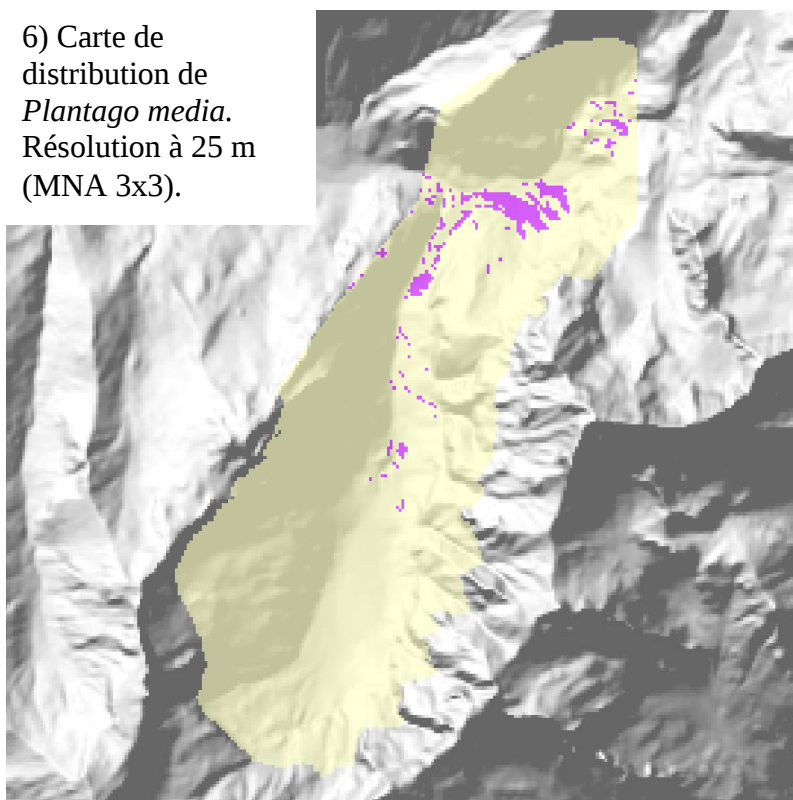


0 0.5 1 2 km 1:50'000

5) Carte de
distribution de
Plantago media.
Résolution à 5 m
(Laser 5x5).

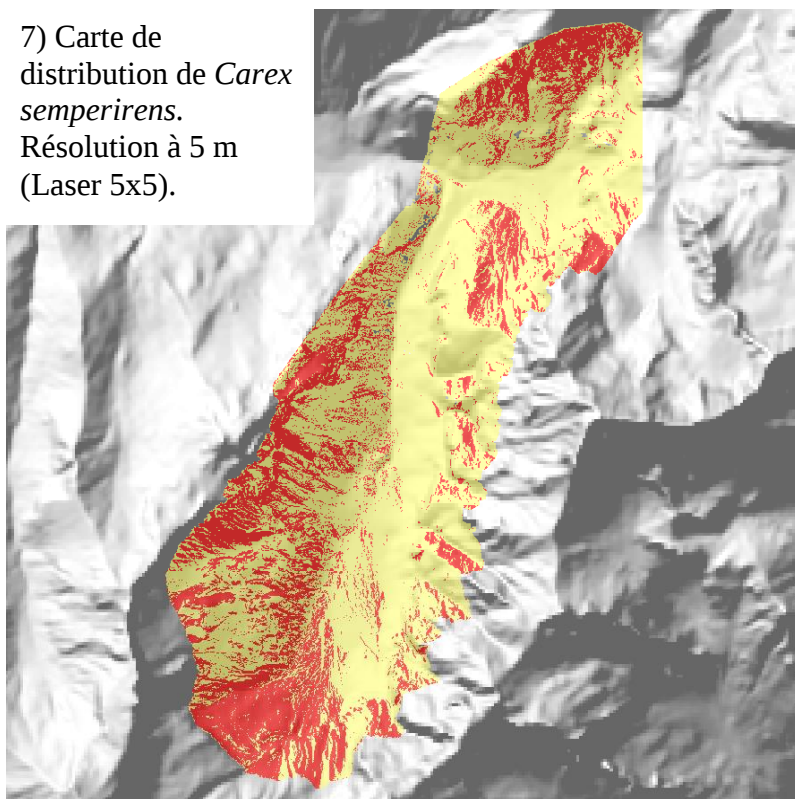


6) Carte de
distribution de
Plantago media.
Résolution à 25 m
(MNA 3x3).

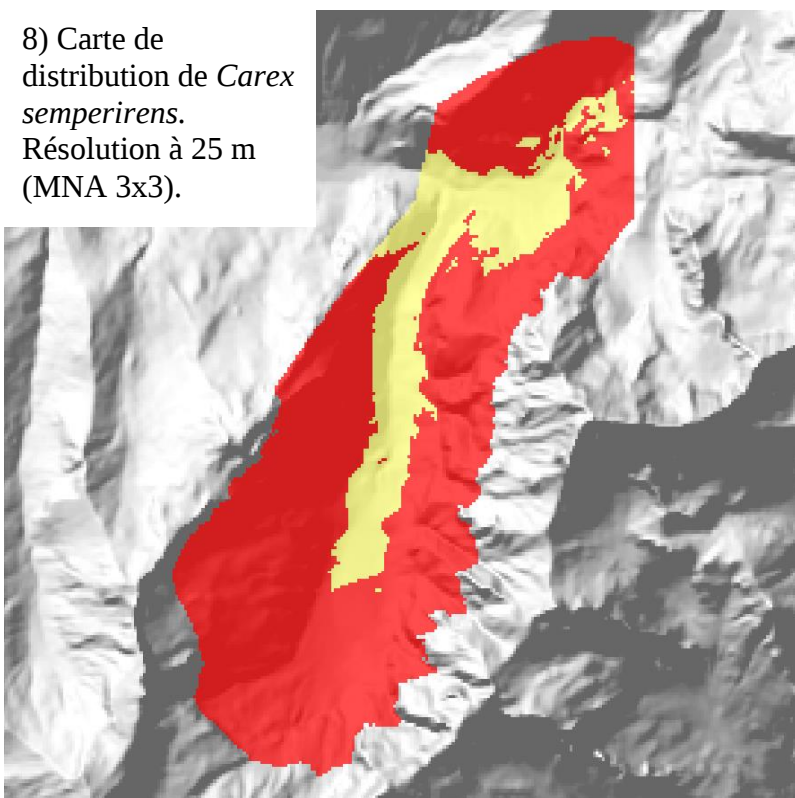


0 0.5 1 2 km 1:50'000

7) Carte de
distribution de *Carex
semperirens*.
Résolution à 5 m
(Laser 5x5).



8) Carte de
distribution de *Carex
semperirens*.
Résolution à 25 m
(MNA 3x3).



0 0.5 1 2 km 1:50'000

Annexe 5 :

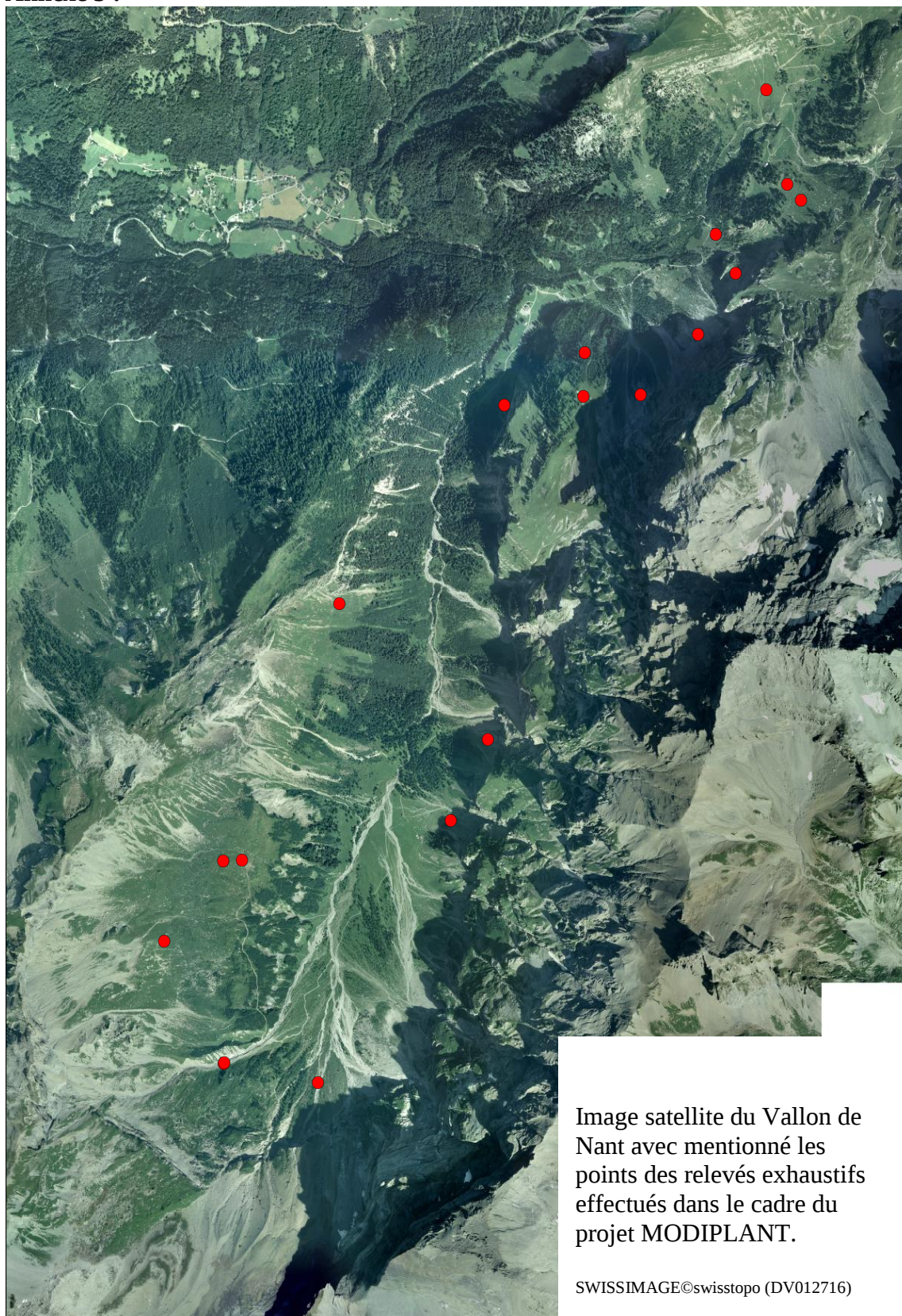
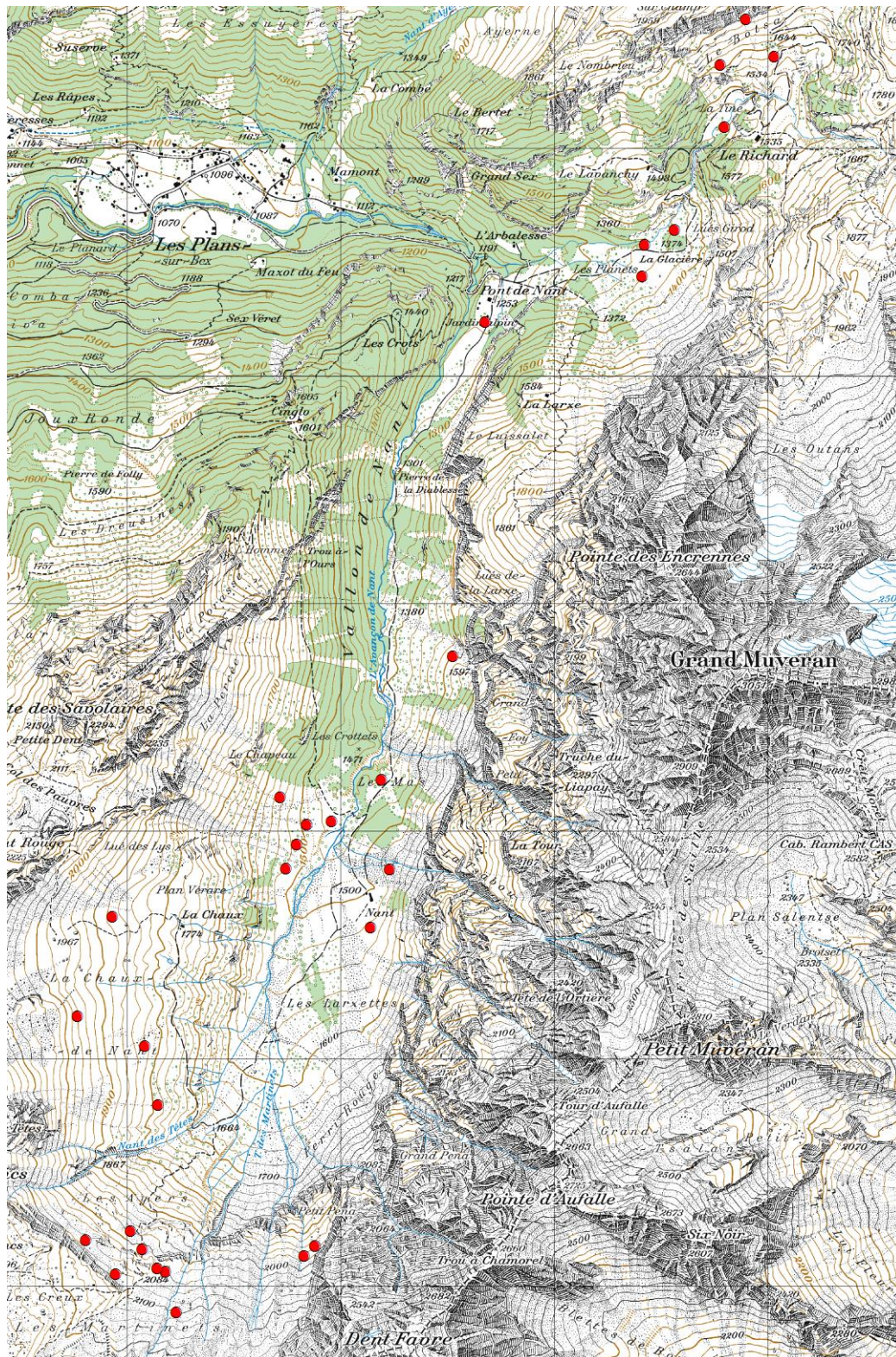


Image satellite du Vallon de Nant avec mentionné les points des relevés exhaustifs effectués dans le cadre du projet MODIPLANT.

SWISSIMAGE©swisstopo (DV012716)

Annexe 6 :

1) Carte du Vallon de Nant avec les points échantillonnés, où les présences des 24 espèces sélectionnées ont été vérifiées.



2) Table des relevés et de leurs coordonnées.

Noms relevés	X	Y
beper-0-2	573178.82	118064.42
nastr-1-4	573231.96	117885.64
baalp-0-1	573879.31	118177.94
controle1	573827.65	118133.34
controle2	573140.13	118078.87
controle3	573072.08	118162.96
beper-1-5	575560.94	122640.72
controle4	575410.16	122437.42
casem-0-4	575424.44	122577.70
daglo-1-2	573083.63	119055.82
beper-1-3	572765.80	119188.81
nastr-1-3	572932.45	119625.92
gaani-0-2	574677.00	122238.99
cycr-1-3	573956.67	120044.59
fepra-1-2	573742.09	119834.39
gaani-1-4	573716.32	120150.09
baalp-1-1	574523.594	120766.860
vearv-1-5	574190.474	120224.262
ruace-1-1	574227.743	119830.550
potri-1-1	574140.958	119576.469
cycr-1-4	573795.758	119942.235
controleruace1	573840.598	120027.754
vagau-1-4	572946.387	118054.053
vagau-1-3	572805.726	118202.075
controlevagau	573014.612	118242.786
gaalb-1-5	573144.702	118797.956
fepra-1-3	576028.308	123405.484
lapra-1-2	575776.272	123366.231
fepra-1-1	575895.990	123566.310
controleruace2	575794.334	123095.922

Légende : Noms des relevés, le premier numéro (1/0) correspond à la présence ou à l'absence de l'espèce focale ; le deuxième numéro (de 1 à 5) les distingue les uns des autres. Pour les abréviations des espèces cf. Tab. 3. La coordonnée X correspond à l'estitude et la coordonnée Y, à la norditude.

Annexe 7 : Langage de programmation de ArcInfo GIS (aml) utilisé pour exporter les présences et les absences de chaque espèce des modèles prédictifs (MNA 25 et Laser 5x5) et les données de chaque prédicteurs de chaque relevé effectué.

```
&works P:\Modiplant\LASER\GEODATA\modele  
P:\Modiplant\LASER\terrain\outsamplelas.txt = sample(pt_ech.txt,modarela5x5,  
modbaalp5x5, modbeper5x5, modcasch5x5, modcasem5x5, modcycr5x5, moddaglo5x5,  
modfepra5x5, modgaalb5x5, modgaani5x5, modhoalp5x5, modlapra5x5, modlimut5x5,  
modnastr5x5, modplla5x5, modplmed5x5, modpoalp5x5, modpotri5x5, modpoviv5x5,  
modranmo5x5, modruace5x5, modsolal5x5, modvagau5x5, modvearv5x5)
```

```
&works P:\Modiplant\LASER\GEODATA\modele\modelemt25  
P:\Modiplant\LASER\terrain\outsamplemnt.txt = sample(pt_ech.txt, modarelamnt25,  
modbaalpmnt25, modbepermnt25, modcaschmnt25, modcasemmnt25, modcycrimnt25,  
moddaglomnt25, modfepramnt25, modgaalbmnt25, modgaanimnt25, modhoalpmnt25,  
modlapramnt25, modlimutmnt25, modnastrmnt25, modplla5mnt25, modplmedmnt25,  
modpoalpmnt25, modpotrimnt25, modpovivmnt25, modranmomnt25, modruacemnt25,  
modsolalmnt25, modvagaumnt25, modvearvmnt25)
```

```
&works P:\Modiplant\LASER\GEODATA  
P:\Modiplant\LASER\terrain\outsamplepred.txt = sample(pt_ech.txt, plaser5x5, pmna25,  
c1laser5x5, c1mna25, c2laser5x5, c2mna25, nord5x5, nordmna25x, est5x5, estmna25)
```

```
&return
```

```
&run P:\Modiplant\LASER\terrain\amlsession1.txt
```

Légende : pt_ech.txt est le fichier .txt où se trouve la liste des relevés effectués.

Tableau 1 : Boxplots et Biplots de l'analyse en composantes principales (ACP) du prédicteur topographique « pente ».

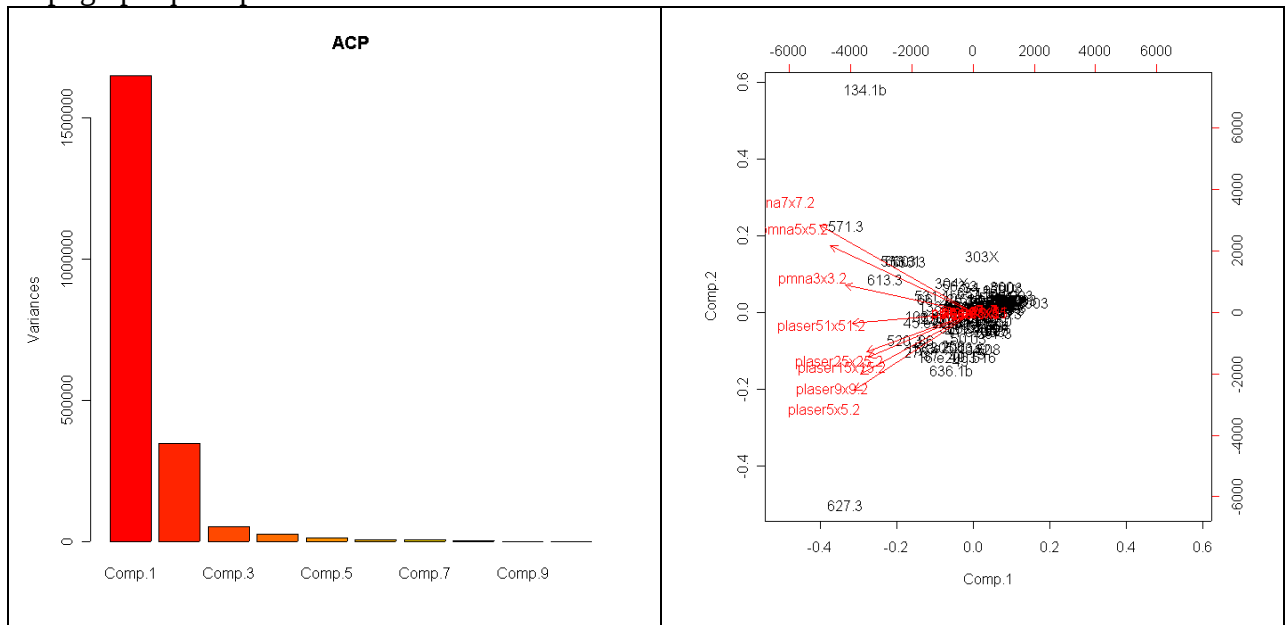
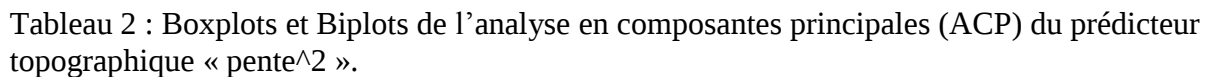


Tableau 3 : Boxplots et Biplots de l'analyse en composantes principales (ACP) du prédicteur topographique « estitude ».

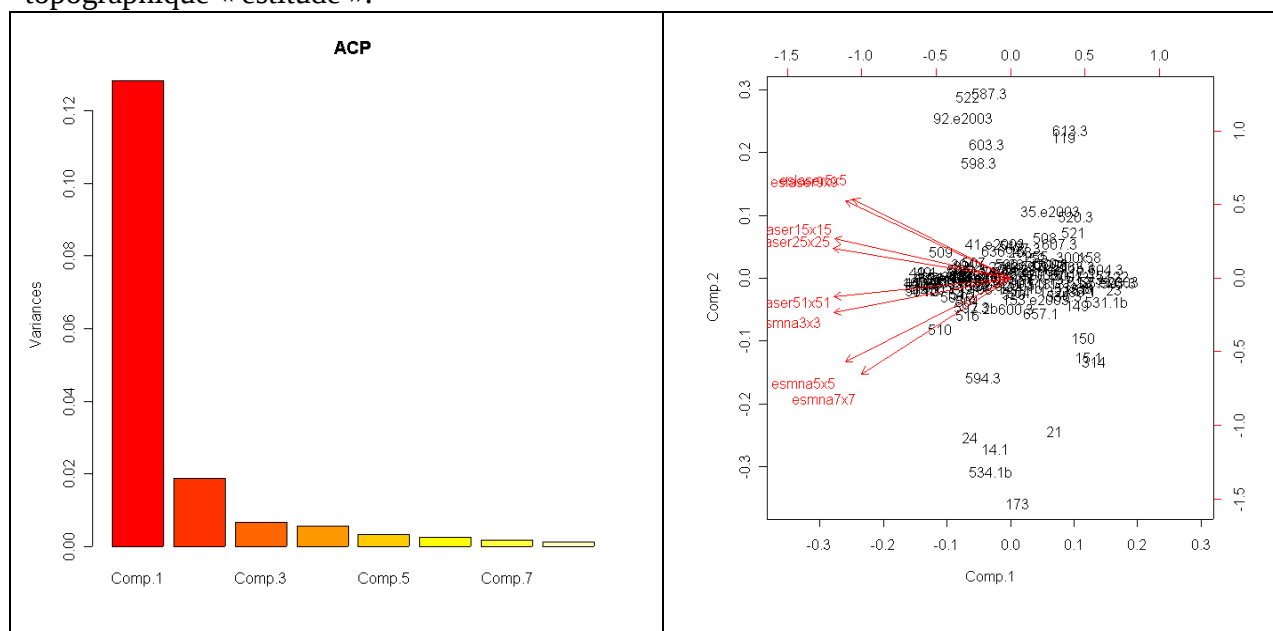
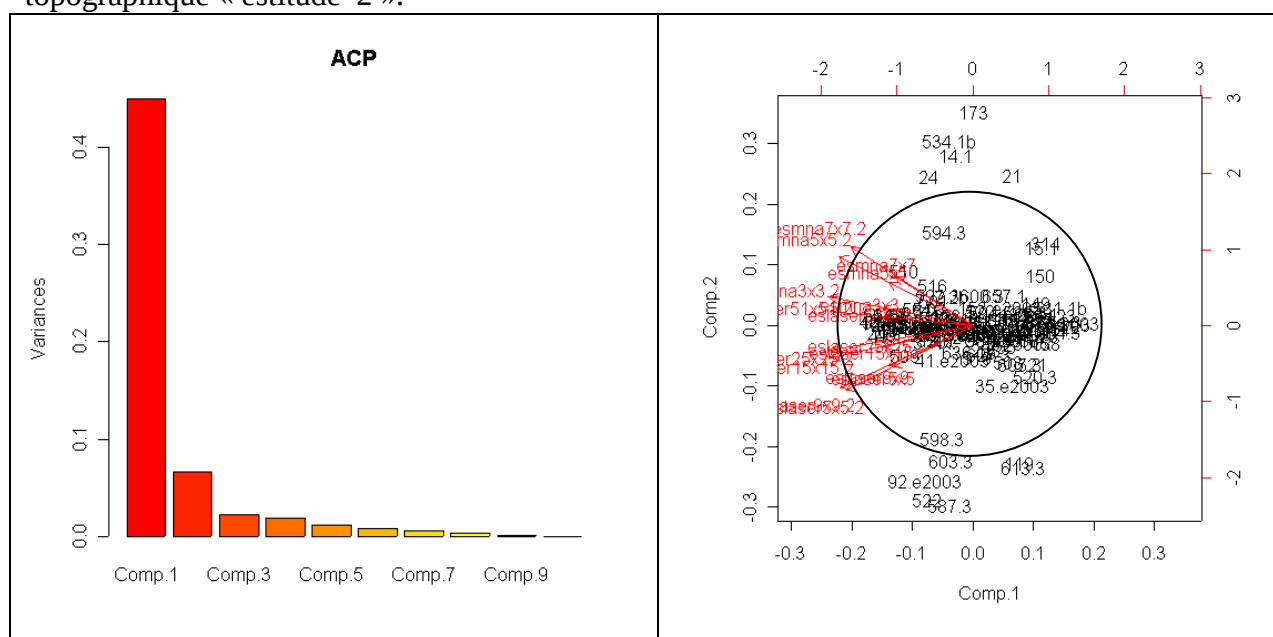


Tableau 4 : Boxplots et Biplots de l'analyse en composantes principales (ACP) du prédicteur topographique « estitude^2 ».



[illegible]

Tableau 7 : Boxplots et Biplots de l'analyse en composantes principales (ACP) du prédicteur topographique « convexité plan (c1) ».

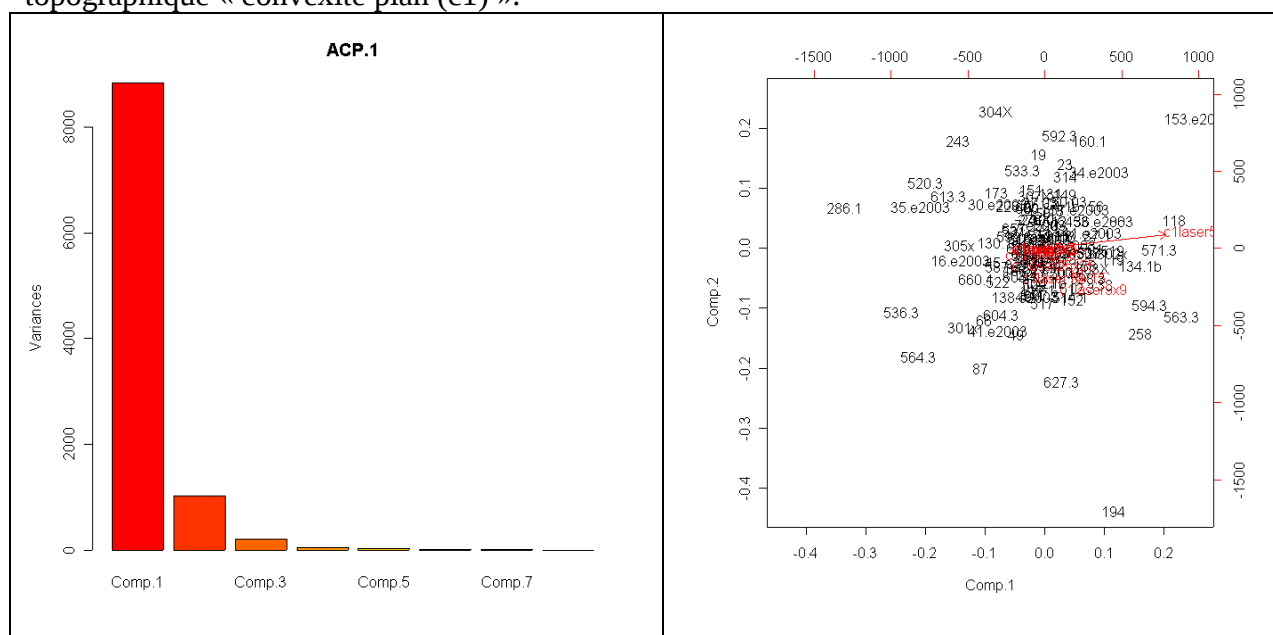
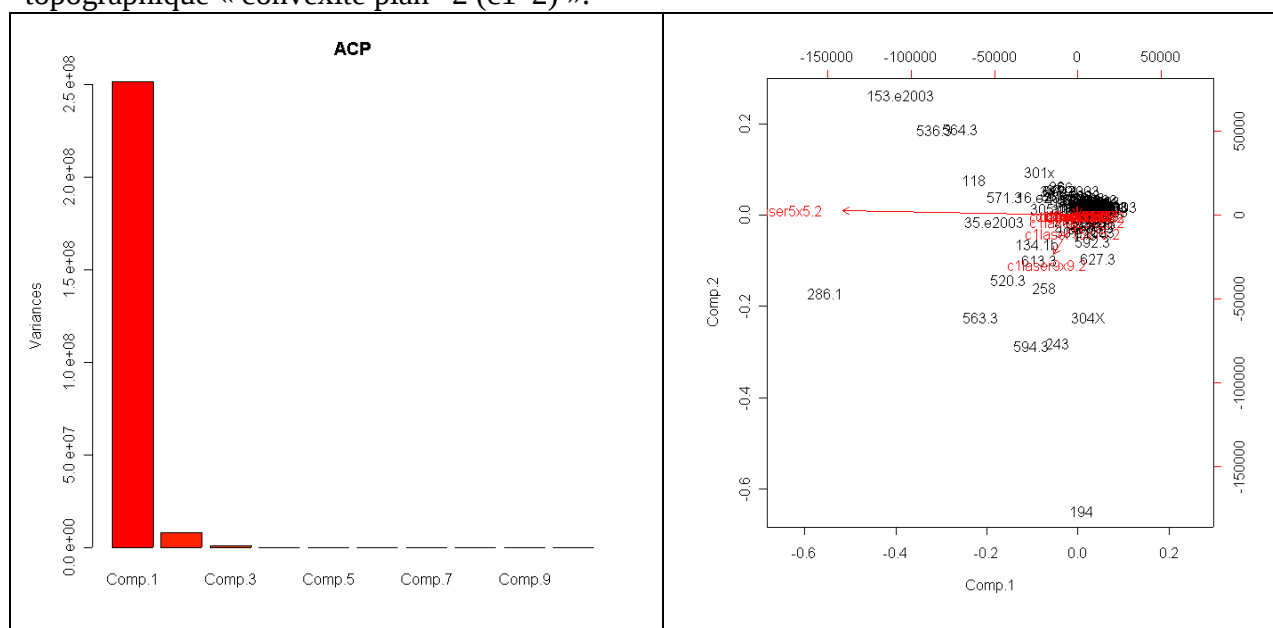


Tableau 8 : Boxplots et Biplots de l'analyse en composantes principales (ACP) du prédicteur topographique « convexité plan ^2 (c1^2) ».



ACP

Variances

Comp.1 Comp.3 Comp.5 Comp.7

PCA

Comp.2

Comp.1

ACP.c2.2

Variances

Comp.1 Comp.3 Comp.5 Comp.7 Comp.9

Comp.2

Comp.1

ser5x5.2

57.e2003

286.1

594.3

564.3

153.e2003

173

16.e2003

598.3

49

563.3

49.1

86

503.3

118

305.e2003

302

339.e2003

271.183

245

Annexe 9: Tableau des évaluations, classés dans l'ordre décroissant, avec les espèces correspondantes. Ce tableau est la référence lors du choix des modèles répondant le mieux aux variables distales fines. Les espèces choisies figurent dans le tableau 3.

Espèces	D2	Espèces	adj.D2	Espèces	AUC	Espèces	AUC'
ARELA	0.994	ARELA	0.993	ARELA	0.968	ARELA	0.936
VEARV	0.993	VEARV	0.993	VEARV	0.943	VEARV	0.886
HOLAN	0.956	HOLAN	0.951	SOLAL	0.929	SOLAL	0.859
DAGLO	0.924	DAGLO	0.918	FEPRA	0.924	FEPRA	0.848
RABUL	0.912	RABUL	0.903	PLLAN	0.917	PLLAN	0.833
POTRI	0.890	POTRI	0.878	POTRI	0.916	POTRI	0.831
RUACE	0.885	RUACE	0.873	VAGAU	0.914	VAGAU	0.828
LOPER	0.861	LOPER	0.848	RANMO	0.913	RANMO	0.827
CARPA	0.812	CARPA	0.789	HOALP	0.912	HOALP	0.824
MELUP	0.761	MELUP	0.736	LIMUT	0.911	LIMUT	0.821
SALRE	0.733	SALRE	0.710	POALP	0.908	POALP	0.816
CYCRI	0.731	CYCRI	0.707	BAALP	0.908	BAALP	0.816
HOALP	0.709	HOALP	0.685	CYCRI	0.905	CYCRI	0.809
VAGAU	0.702	VAGAU	0.679	LAPRA	0.903	LAPRA	0.807
LAPRA	0.700	LAPRA	0.676	RUACE	0.903	RUACE	0.805
SOLAL	0.680	SOLAL	0.655	DAGLO	0.902	DAGLO	0.803
SAMIN	0.675	SAMIN	0.644	POVIV	0.902	POVIV	0.803
FEPRA	0.665	FEPRA	0.639	GAANI	0.900	GAANI	0.801
CASCH	0.659	LIMUT	0.631	BEPER	0.899	BEPER	0.798
LIMUT	0.658	PLLAN	0.630	CASCH	0.898	CASCH	0.796
PLLAN	0.655	CASCH	0.627	PLALP	0.898	PLALP	0.796
GEMON	0.644	GEMON	0.609	CECAE	0.889	CECAE	0.778
POALP	0.623	POALP	0.593	GAALB	0.888	GAALB	0.776
VICRA	0.612	VICRA	0.584	NASTR	0.887	NASTR	0.775
CACAR	0.605	CACAR	0.572	SESEL	0.887	SESEL	0.774
GAALB	0.602	GAALB	0.567	PLMED	0.886	PLMED	0.773
CEJAC	0.595	CEJAC	0.565	POPRA	0.886	POPRA	0.772
BAALP	0.588	BAALP	0.565	TRFLA	0.884	TRFLA	0.768
POVIV	0.583	GAANI	0.554	RANAA	0.883	RANAA	0.766
PLMED	0.578	POVIV	0.552	TAOFF	0.883	TAOFF	0.765
GAANI	0.575	PLMED	0.543	SAMIN	0.881	SAMIN	0.763
THEAL	0.569	RANMO	0.543	POAUR	0.880	POAUR	0.761
RANMO	0.559	BEPER	0.527	CACAR	0.880	CACAR	0.760
CARHO	0.553	THEAL	0.519	CASIM	0.879	CASIM	0.759
BEPER	0.550	CARHO	0.510	ACMIL	0.879	ACMIL	0.758
CRAUR	0.539	CRAUR	0.502	TRIIRE	0.877	TRIIRE	0.755
BRERE	0.534	BRERE	0.501	HERSP	0.876	HERSP	0.752
TRIIRE	0.529	TRIIRE	0.496	CASEM	0.876	CASEM	0.752
CECAE	0.520	PLALP	0.489	POCRA	0.873	POCRA	0.745
TRFLA	0.516	TRFLA	0.487	SALRE	0.872	SALRE	0.745
CASIM	0.513	CECAE	0.486	ALCON	0.872	ALCON	0.744
PLALP	0.511	CASIM	0.482	LOPER	0.871	LOPER	0.741
HERSP	0.509	HERSP	0.478	TRORI	0.870	TRORI	0.741
ALCON	0.508	POAUR	0.473	CRAUR	0.869	CRAUR	0.738
VISEP	0.506	ALCON	0.473	VICRA	0.866	VICRA	0.732
POAUR	0.506	VISEP	0.473	HOLAN	0.866	HOLAN	0.731
CHAH	0.506	RANAA	0.462	GEMON	0.864	GEMON	0.729
RANAA	0.493	SESEL	0.461	CARHO	0.864	CARHO	0.727
ACMIL	0.492	ACMIL	0.459	VISEP	0.864	VISEP	0.727
SESEL	0.489	CHAH	0.458	CEJAC	0.863	CEJAC	0.726
GENCA	0.487	GENCA	0.453	BRMED	0.860	BRMED	0.720
CASEM	0.484	CASEM	0.449	VECHA	0.859	VECHA	0.718
BRMED	0.481	POCRA	0.442	PLATR	0.859	PLATR	0.718

POCRA	0.478	NASTR	0.442	BRERE	0.859	BRERE	0.717
POERE	0.470	TAOFF	0.440	RABUL	0.856	RABUL	0.713
NASTR	0.466	POPRA	0.435	POERE	0.855	POERE	0.711
POPRA	0.463	BRMED	0.430	HIAUR	0.851	HIAUR	0.703
TAOFF	0.461	POERE	0.427	PRIVE	0.850	PRIVE	0.699
VECHA	0.453	TRORI	0.424	BEMIC	0.849	BEMIC	0.699
TRORI	0.453	VECHA	0.418	GENCA	0.848	GENCA	0.697
BEMIC	0.450	PLATR	0.413	VAMYR	0.848	VAMYR	0.695
PLATR	0.447	BEMIC	0.411	SECOE	0.847	SECOE	0.693
LUMUL	0.444	HIAUR	0.401	THEAL	0.841	THEAL	0.683
HIAUR	0.438	LUMUL	0.395	LUMUL	0.837	LUMUL	0.674
SECOE	0.419	VAMYR	0.388	EUCYP	0.832	EUCYP	0.664
EUCYP	0.419	SECOE	0.388	ANTVL	0.830	ANTVL	0.660
SCLUC	0.416	EUCYP	0.374	THAPG	0.828	THAPG	0.656
VAMYR	0.415	PRIVE	0.371	AGTEN	0.825	AGTEN	0.651
ANTVL	0.411	ANTVL	0.371	HEPUB	0.823	HEPUB	0.647
VIBIF	0.410	SCLUC	0.365	CADEF	0.823	CADEF	0.645
CADEF	0.402	CADEF	0.363	SCLUC	0.820	SCLUC	0.639
THAPG	0.402	VIBIF	0.358	PUALP	0.819	PUALP	0.638
PRIVE	0.401	PUALP	0.351	PHAPI	0.818	PHAPI	0.637
DECAE	0.389	THAPG	0.349	HELNU	0.817	HELNU	0.634
PUALP	0.387	DECAE	0.347	DECAE	0.816	DECAE	0.632
AGTEN	0.379	AGTEN	0.340	CHAH	0.816	CHAH	0.632
ALCXA	0.372	HEPUB	0.329	CARPA	0.813	CARPA	0.626
HEPUB	0.368	HELNU	0.325	AJREP	0.810	AJREP	0.620
HELNU	0.364	ALCXA	0.321	ASMAJ	0.809	ASMAJ	0.617
HICOM	0.347	PHAPI	0.307	HIBIF	0.807	HIBIF	0.614
PRVUL	0.342	PRVUL	0.301	ALCXA	0.806	ALCXA	0.612
TRPRA	0.334	HICOM	0.295	MELUP	0.802	MELUP	0.604
TREUR	0.331	TRPRA	0.294	PRVUL	0.795	PRVUL	0.590
CRBLA	0.329	HIBIF	0.291	GESIL	0.791	GESIL	0.582
PHAPI	0.328	TREUR	0.287	VIBIF	0.789	VIBIF	0.578
HIBIF	0.324	PHORB	0.281	TRPRA	0.788	TRPRA	0.577
PHORB	0.323	CRBLA	0.279	PHORB	0.787	PHORB	0.574
AJREP	0.318	AJREP	0.278	HYMAC	0.785	HYMAC	0.570
CRALB	0.315	ASMAJ	0.274	CRBLA	0.779	CRBLA	0.557
ASMAJ	0.300	CRALB	0.252	TREUR	0.778	TREUR	0.555
GESIL	0.299	GESIL	0.247	HICOM	0.776	HICOM	0.552
KNSIL	0.294	KNSIL	0.247	CRALB	0.768	CRALB	0.535
ALGLA	0.285	RANEM	0.237	KNSIL	0.764	KNSIL	0.528
RANEM	0.280	FERUB	0.233	RANEM	0.763	RANEM	0.526
FERUB	0.275	HYMAC	0.230	RHALE	0.756	RHALE	0.512
HYMAC	0.270	RHALE	0.227	FERUB	0.755	FERUB	0.510
RHALE	0.268	ALGLA	0.218	ALGLA	0.721	ALGLA	0.443
PIMAJ	0.247	PIMAJ	0.181	PIMAJ	0.712	PIMAJ	0.424
SILVU	0.219	SILVU	0.155	SILVU	0.711	SILVU	0.422
ANTOD	0.197	ANTOD	0.142	ANTOD	0.701	ANTOD	0.401
LOCOR	0.177	LOCOR	0.139	LOCOR	0.696	LOCOR	0.393
LEOHA	0.162	LEOHA	0.120	CHPRA	0.693	CHPRA	0.387
CHPRA	0.159	CHPRA	0.109	LEOHA	0.681	LEOHA	0.362

Légende : D2, déviance des modèles, adjD2, déviance ajustée des modèles, AUC, aire sous la courbe, AUC', coefficient de Gini. Pour les abréviations cf. Annexe 1.