

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION.....	- 2 -
2	MATHERIELS ET METHODES	- 4 -
2.1	Aire d'étude.....	- 4 -
2.2	Echantillonnage	- 5 -
2.3	Analyses	- 6 -
2.3.1	<i>Analyse phytosociologique</i>	- 6 -
2.3.2	<i>Prédiction spatiale</i>	- 7 -
3	RESULTATS	- 9 -
3.1	Analyse phytosociologique	- 9 -
3.2	Prédiction spatiale	- 10 -
4	DISCUSSION	- 12 -
4.1	Mesobromion erecti (groupe 10).....	- 12 -
4.2	Nardion strictae (groupe 6)	- 13 -
4.3	Seslerion (groupe 9)	- 14 -
4.4	Cynosurion (groupe 8)	- 15 -
4.5	Arrhenatherion elatiori (groupe 5)	- 16 -
4.6	Thlaspiion rotundifolii (groupes 1, 3 et 4)	- 16 -
4.7	Arabidion caerulae/Caricion firmae (groupe 7)	- 18 -
4.8	Groupe non classés.....	- 18 -
5	CONCLUSIONS	- 20 -
6	REMERCIEMENTS	- 21 -
7	BIBLIOGRAPHIE	- 22 -
8	ANNEXES	- 23 -

1 INTRODUCTION

Les espèces végétales ne sont pas distribuées au hasard dans l'environnement, mais elles ont tendance à former des groupements qui sont en équilibre avec les facteurs écologiques et l'activité humaine. La nécessité d'une étude de ces groupements a donné naissance, au début du siècle passé, à plusieurs disciplines parmi lesquelles la phytosociologie. Son origine est classiquement attachée au nom de J. BRAUN-BLANQUET (1884-1980). Depuis, la phytosociologie sigmatiste a affiné ses méthodes, précisé ses concepts, et surtout accumulé une somme considérable de travaux (GEHU 1987). Cette science repose initialement sur un fait d'observation : la répétitivité, à l'échelle d'un territoire donné, des mêmes ensembles d'espèces (donc des mêmes communautés floristiques) dans des stations spatialement distinctes. L'exploitation d'un ensemble plus ou moins conséquent de relevés relatifs à divers types de communautés végétales d'un territoire implique la mise en oeuvre de techniques adaptées au traitement de ces données. Parmi les méthodes utilisées, on peut rappeler la méthode classique (GEHU et RIVAS-MARTINEZ 1981), l'analyse factorielle de correspondance (AFC) (BENZECRI 1973), et des méthodes plus récentes comme la photo-interprétation par stéréoscopie réalisée sur la base de photographies aériennes infrarouges fausses couleurs combinée à des visites sur le terrain (THIELEN *et al.* 2003). La méthode classique, à la base des travaux phytosociologique depuis l'origine, réside dans le tri et le classement manuel des relevés permettant d'aboutir, par établissement de tableaux ou matrices successives, à la discrimination d'ensembles supposés floristiquement homogènes. L'AFC est la méthode moderne et reproductible du tri manuel qui permet la discrimination des ensembles de relevés de composition floristique proche. Sur la base de ces deux principes plusieurs techniques automatisées pour la classification et l'analyse de végétation ont été développées (TICHY 2002). La cartographie grâce à la photo-interprétation par stéréoscopie a été utilisée avec succès dans la création de cartes des zones alluviales (THIELEN 2003), cependant son application à d'autres types de formation (forêt de feuillus et pelouse alpine sur sol calcaire) pose des limites surtout en raison de la difficulté dans l'interprétation des photographies qui ne permet pas toujours de différencier correctement les différentes communautés végétales. En effet, des formations ouvertes comme les prairies alpines produisent par réflexion un bruit de fond qui modifie la propriété spectrale des divers types de végétation (GOWARD *et al.* 1994 cité dans DIRNBÖCK *et al.* 2003). Ces trois méthodes de classification présentent des différences au niveau de la résolution (niveau syntaxonomique). En effet, si la méthode

classique permet de caractériser des relevés jusqu'aux niveaux plus basses (association,...), l'AFC et la photo-interprétation posent souvent des limitations. D'autre part il faut considérer que, la transition entre deux milieux est rarement nette et donc la caractérisation des relevés est souvent difficile. Cependant, l'étude de la végétation ne se limite pas à une analyse des plusieurs niveau qui caractérisent le monde végétal. En effet, d'autres facteurs comme les interactions avec l'environnement et leur distribution sont pris en considération. Un certain nombre d'outils statistiques ont été utilisés pour identifier les variables écologiques qui influencent la répartition des communautés végétales permettant ainsi de simuler leur distribution spatiale (BRZEZIECKI *et al.* 1993 ; ZIMMERMAN et KIENAST 1999).

Ce travail se propose de combiner la caractérisation phytosociologique par l'analyse de tableaux de végétation à la modélisation spatiale de communauté. La possibilité de pouvoir modéliser des communautés de prairie qui, a première vue, peuvent apparaître identiques s'appuie sur l'étroite relation qui existe entre ces entité et les variables environnementales. D'ailleurs la corrélation entre espèces, types fonctionnels, communautés et biomes avec des variables environnementales a été utilisée pour la modélisation spatiale à différents type d'échelle ; de l'échelle globale (PRENTICE *et al.* 1992), à l'échelle continentale (LEATHWICK 1995), jusqu'à l'échelle locale (FRANKLIN 1998, HIGGINS *et al.* 1999).

Mais quel'est l'intérêt d'un tel type d'étude ? Les cartes de végétation trouvent leur application pratique essentiellement au niveau de l'aménagement du territoire. En effet phytosociologie et conservation de la nature sont deux activités étroitement liées, la seconde pouvant s'appuyer largement sur la première. Les méthodes de la phytosociologie moderne permettent en effet une bonne évaluation scientifique de la valeur biologique d'un territoire et de mieux orienter et contrôler la gestion de ces espaces (GEHU 1987). D'autre part, comme les communautés végétales sont étroitement liées à des facteurs climatiques et topographiques particuliers, cette flore se trouve très souvent associée à une faune parfois exclusive. Il faut donc considérer que la gestion d'une entité supérieure au niveau spécifique, telles que les communautés végétales, comporte une cascade de retombées positives qui vont bien au-delà de quelques espèces végétales.

Le but de ce travail est de caractériser phytosociologiquement les 517 relevés échantillonnés dans le contexte du projet MODIPLANT (GUISAN 2002) ainsi que d'établir, à l'aide d'un modèle statistique, des liens avec les conditions environnementales de ces entités afin de générer des cartes de distribution potentielle.

2 MATHERIELS ET METHODES

2.1 Aire d'étude

L'aire d'étude se trouve sur le territoire du canton de Vaud. Elle comprend une surface de 704.2 Km² qui s'étale de la plaine du Rhône vers le nord-est dans les Préalpes vaudoises jusqu'à la frontière du canton (Fig. 1). La zone est caractérisée par un fort gradient altitudinale allant d'une altitude minimale de 370 m jusqu'à une altitude maximale de 3200 m (sommet des Diablerets, 3209 m). Le climat de cette région est de type subocéanique avec une pluviosité assez élevée. Néanmoins, certaines zones s'avèrent être plus sèches en raison de l'effet de barrage que certains massifs exercent sur les perturbations provenant de l'ouest.

En ce qui concerne l'aspect la géologie, la zone d'étude présente surtout des roches carbonatées, sauf aux pieds des dents de Morcle où un socle siliceux constitué de granite et de gneiss affleure.

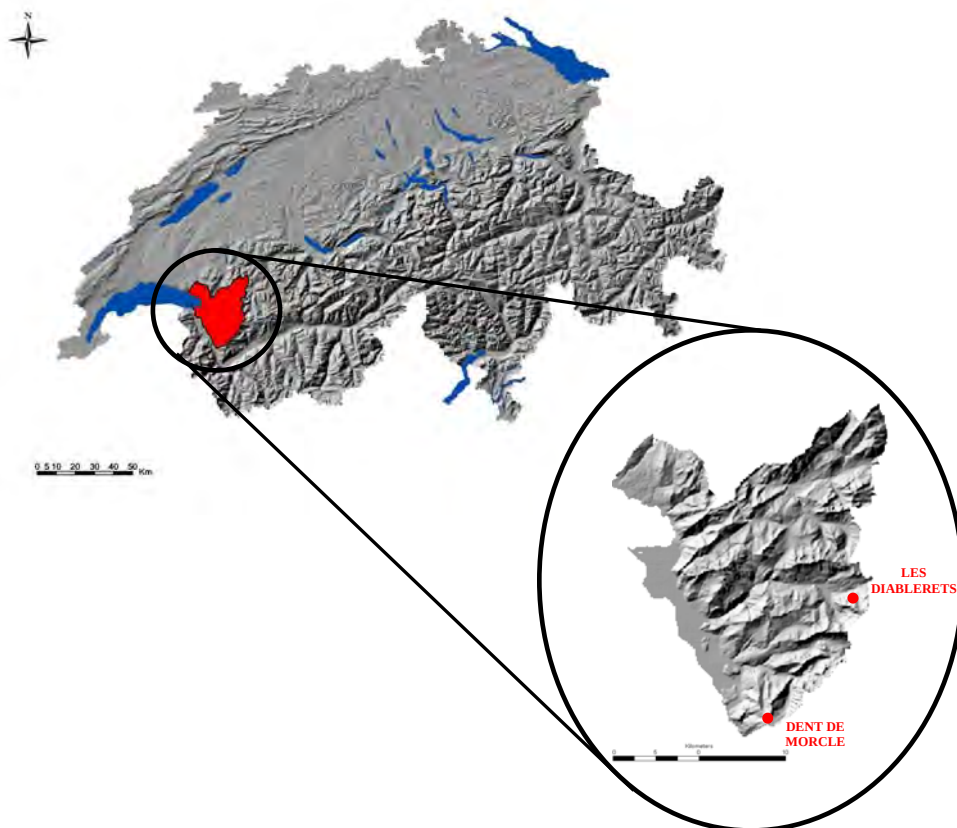


Fig.1. Aire d'étude

2.2 Echantillonnage

Les données de terrain utilisées pour la réalisation de ce travail ont été récoltées par l'équipe du projet MODIPLANT (GUISAN 2002). Pendant l'été 2002 et l'été 2003 517 relevés ont été échantillonnés dans tous les milieux ouverts de l'aire d'étude à l'exception des milieux humides et des zones urbanisées. L'emplacement des relevés a été défini selon un échantillonnage aléatoire-stratifié (EAS). Quatre facteurs stratificateurs ont été retenus comme pertinents pour garantir une représentativité de l'échantillonnage ; altitude, pente, exposition, géologie. En ce qui concerne la géologie, les strates utilisées se sont surtout basées sur la perméabilité de la roche mère. Pour chaque combinaison possible des quatre facteurs stratificateurs, un nombre égal de points a été tiré aléatoirement en prenant soin que ceux-ci correspondent aux intersections de la maille hectométrique de GEOSTAT¹ (100 m x 100 m). Sur le terrain, la localisation des points a été faite à l'aide d'une carte topographique et du GPS (Trimble, GeoExplorer® 3).

Les relevés de végétation ont été faits en utilisant un dispositif hiérarchique au sol: 4 surfaces emboîtées, dont la plus grande (IV) est centrée sur le point G (GEOSTAT) (Fig. 2). Pour les 4 surfaces chaque espèce a été identifiée et notée. En ce qui concerne la surface 2m x 2m une estimation de l'abondance a été effectuée selon la méthode BRAUN-BLANQUET (1964) (Table 1). Lorsqu'il était possible les relevés ont été rattachés à une alliance selon DELARZE *et al.* (1998).

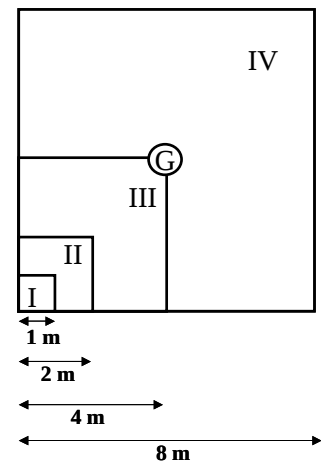


Fig. 2. Dispositif d'échantillonnage

Tableau 1. Classe d'abondance selon Braun-Blanquet

Echelle	description	Valeur numérique
r	Rare (maximum 2 individus)	0.1
+	Pas rare mais moins de 1% de recouvrement	0.5
1	1-5% de recouvrement	1
2a	5-13% de recouvrement	2
2b	13-25% de recouvrement	2.5
3	25-50% de recouvrement	3
4	50-75% de recouvrement	4
5	75-100% de recouvrement	5

¹ GEOSTAT (Office Fédéral de la Statistique) : www.statistik.admin.ch

2.3 Analyses

Dans cette étude toutes les analyses ont été effectuées avec le logiciel R (v. 1.8.0 (2003), R development Core Team). Tandis que l'élaboration des cartes a été effectuée avec ESRI® ArcGIS™ 8.3 (1999-2002, ESRI Inc., California, USA).

2.3.1 Analyse phytosociologique

Seul les espèces présentes dans le carré 2 m x 2 m ont été considérées pour l'étude phytosociologique. De plus, toutes les espèces qui ne sont pas présentes dans plus de 25 relevées (~5% des points échantillonnés) n'ont pas été considérées (MÜLLER et GÜSEWELL 2003). Les estimations de recouvrement non numériques ont été remplacées en utilisant une transformation qui permet de donner une importance moyenne aux espèces peu fréquentes (Tableau 1).

La classification des relevés a été effectuée selon la méthode élaborée par VITTOZ et GUIBAN (2002) sur la base des bibliothèques de macro (*library*) VEGAN² et labdsv³. Il s'agit d'effectuer successivement un groupement sur les relevés et sur les espèces, pour ensuite les comparer et détecter les correspondances entre les deux. La première étape consiste à effectuer des groupements selon la ressemblance entre relevés d'après la présence et l'abondance des espèces. Une matrice de ressemblance est calculée avec le coefficient de Bray-Curtys et un dendrogramme est créé sur la base de cette matrice par la méthode de groupement Ward's minimum variance (minimise la variance de chaque groupe). Finalement, le nombre de groupes désiré est choisi en analysant le dendrogramme. La même méthode est utilisée pour créer des groupes d'espèces.

La deuxième étape consiste en une analyse discriminante permettant de détecter les espèces différentielles, utiles pour mieux séparer les groupes de relevés les uns par rapport aux autres. La valeur discriminante de chaque espèce est multipliée par l'abondance moyenne de l'espèce dans chaque groupe pour éviter d'avoir la même valeur (maximale) pour les espèces présentes dans tous les relevés d'un groupe et les espèces présentes dans un seul des relevés du tableau. Avec l'aide des espèces ayant une valeur discriminante élevée, indiquant ainsi leur fidélité à un groupe bien précis, il est possible d'assigner les relevés à une ou plusieurs alliances déjà décrites selon DELARZE *et al.* (1998).

² Laboratory for Dynamic Synthetic Vegetation Phenomenology <http://labdsv.nr.usu.edu/>

³ <http://cc.oulu.fi/~jarioksa/softhelp/vegan.html>

2.3.2 Prédiction spatiale

Le but de cette analyse est d'obtenir une carte de distribution potentielle des alliances définies avec l'analyse des tableaux de végétation. Chaque alliance est représentée par un groupe de relevés proches du point de vue phytosociologique. Dans le cadre de cette analyse chaque relevé est considéré comme un point de présence de l'alliance à laquelle il appartient. Par conséquent tous les autres relevés ne faisant pas partie de ce groupe ont été considérés comme absence. L'observation de la présence ou de l'absence d'une alliance sur l'ensemble des relevés fournit un vecteur binaire d'observation constitué de 0 et de 1. La relation entre présence/absence et les variables environnementales est mise en évidence par des GLM. L'avantage de cet outil statistique réside dans sa flexibilité, permettant de modéliser plusieurs types de distributions de probabilité. La présence/absence des communautés a été ici modélisée en spécifiant une distribution binomiale.

Le choix et la sélection des variables environnementales utilisées pour l'ajustement des modèles ont été effectués en trois étapes. Dans un premier temps, le choix des variables a été fait en s'appuyant sur des tests de corrélation. Un test de corrélation de Spearman a été appliqué aux informations relatives à chaque pixel de plusieurs couches environnementales. Pour faciliter l'interprétation, une visualisation graphique sous forme d'arbre a été effectuée (Fig.3). Parmi deux variables fortement corrélée la plus proximale a été retenue (PAUSAS et AUSTIN 2001).

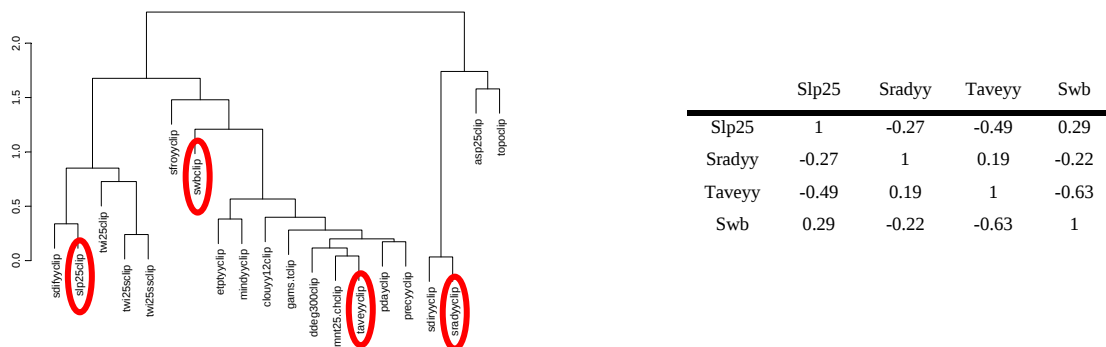


Fig. 3. Arbre UPGMA calculé sur la distance Euclidienne entre les coefficients de corrélation entre variables environnementales.

Cet arbre ne permet que de discriminer les groupes de variables qui sont fortement corrélées entre eux. La méthode est par contre mauvaise pour distinguer les variables peut corrélée entre elle à cause d'une distorsion causée par la distance Euclidienne.

Variables sélectionnées pour le modèle prédictif.

Tableau avec les coefficients de corrélations de Spearman

Les variables retenues pour l'ajustement des modèles sont résumées dans le Tableau 2. Dans un deuxième temps, une procédure de sélection stepwise AIC (Akaike Information Criterion ; voir MCCULLANGH et NELLDER 1983) a été utilisée pour effectuer une sélection grossière des prédicteurs expliquant une partie significative de la variance de départ. Finalement, les prédicteurs ont été retenus dans le modèle final seulement si leur p-value était inférieure à 0.05.

Tableau 2. Variables environnementales : nom, description, unité et source (WSL : Niklaus Zimmermann et Felix Kienast)

Variable	Indication	unité	propriétaire
Taveyy	Température annuelle moyenne	°C*100	WSL
Slp25	Pente dérivée de l'MNT25	degré	swisstopo
swb	Indice d'humidité qui considère les propriétés du sol	l/10mm/an	WSL
Sradyy	Somme des radiations pendant une année	kJ/jour/an	WSL

Une mesure d'adéquation du modèle a été calculée par l'approche ROC, avec le calcul d'une valeur AUC et sa transformation en coefficient de Gini (voir COPAS 1999 ; ENGLER *et al.* in press). Pour tester la robustesse des modèles, la valeur AUC et le coefficient de Gini, ont également été calculés par une méthode de ré-échantillonnage Jackknife.

A partir des modèles obtenus, une représentation graphique a été générée, pour chaque alliance, à l'aide d'outils SIG, pour permettre une meilleure interprétation des résultats. Toutes les cartes ont été masquées par la forêt, les zones habitées et toutes les zones où le type d'exploitation humaine influence considérablement la végétation (pépinières, vignes, verger).

3 RESULTATS

3.1 Analyse phytosociologique

L'analyse du dendrogramme obtenus lors du groupement des relevés a permis d'identifier 10 groupes. Sur la base des espèces discriminantes seuls 9 groupes ont pu être rattachés, par comparaison avec la littérature phytosociologique, à des alliances déjà décrites (Tableau 3). Il faut cependant remarquer que le rattachement d'un groupe de relevés à une alliance reste de toute façon indicatif. En effet, il serait plus correct de considérer plutôt le lien groupe-alliance comme une tendance. Ceci vient du fait que parfois à l'intérieur d'un groupe sont présents des relevés qui, d'un point de vue phytosociologique, sont des transitions entre deux alliances proches.

Les résultats montrent une bonne correspondance entre les groupes de relevés et les groupes d'espèces, dans le sens où les groupes de relevés sont au plus caractérisés par deux groupes d'espèces (Annexe 1-7). Une comparaison entre la caractérisation phytosociologique obtenues par l'analyse quantitative et celle effectuée sur le terrain montre une bonne correspondance (Annexe 8).

A titre exploratoire, une analyse de variance par paire a été effectuée pour tester s'il existe une différence significative de richesse spécifique (pour une surface de 2m x 2m) entre les différents groupes. Le résultat permet de classer les 10 groupes en 4 blocs. Tous les groupes à l'intérieur d'un même bloc ne diffèrent pas significativement du point de vue du nombre d'espèce (ANOVA : $p\text{-value} < 0.05$), tandis que chaque élément d'un bloc présente une richesse significativement différente avec tous les groupes des autres blocs (ANOVA : $p\text{-value} < 0.05$) (Tableau 3).

Le bloc 4, représenté par le *Mesobromion erecti*, présente la richesse spécifique la plus élevée (42.56 espèces en moyenne). Le bloc 3 est composé de trois alliances liées aux pâturages (*Cynosurion*, *Seslerion*, *Nardion strictae*) ayant une richesse en espèces qui varie de 35 à 36 espèces en moyennes. Le nombre moyen d'espèces du bloc 2 varie entre 20.56 et 23.61. L'analyse phytosociologique a permis de rattacher sans problème le groupe 5 à l'*Arrhenatherion elatiori*, grâce à des espèces discriminantes comme *Arrhenatherus elatior*, *Poa trivialis*, *Dactylis glomerata* et d'autres espèces caractéristiques des prairies de fauche. Les relevés regroupés dans le groupe 7 ne peuvent pas être rattachés à une alliance de façon certaine. En effet ce groupe est caractérisé par des espèces de combes à neige (*Arabidion*

caerulae) comme *Salix retusa* et *Ranunculus alpestris* et par des espèces caractéristiques des pelouses calcaires sèches à laîche ferme (*Caricion firmae*) telles que *Silene acaulis*, *Festuca quadriflora*, *Carex sempervirens* et *Dryas octopetala*. Le groupe 2 ne présente aucune espèce discriminante et donc sa classification n'a pas été possible. Le bloc 1 présente une richesse sensiblement inférieure. Les groupes 4, 3 et 1, ayant respectivement une richesse moyenne de 8.2, 1.78 et 1.17 espèces, présentent une tendance vers le *Thlaspion rotundifolii*.

Tableau 3 Tableau résumant les caractéristiques de chaque groupe. Les groupes ont été triés par le nombre d'espèce moyen de chaque groupe

	Groupes de relevés	Nombre d'espèces moyen	Nombre de relevés	Alliance
Bloc 1	Groupe 3	1.17	6	<i>Thlaspion rotundifolii</i>
	Groupe 1	1.78	9	<i>Thlaspion rotundifolii</i>
	Groupe 4	8.92	26	<i>Thlaspion rotundifolii</i>
Bloc 2	Groupe 2	20.56	94	Non classé
	Groupe 7	23.20	20	<i>Arabidion caerulae/Caricion firmae</i>
	Groupe 5	23.61	44	<i>Arrhenatherion elatiori</i>
Bloc 3	Groupe 8	35.00	115	<i>Cynosurion</i>
	Groupe 9	35.85	55	<i>Seslerion</i>
	Groupe 6	36.14	63	<i>Nardion strictae</i>
Bloc 4	Groupe 10	42.56	52	<i>Mesobromion erecti</i>

3.2 Prédiction spatiale

Les modèles obtenus pour les 7 alliances expliquent entre 32% et 61% de la variance totale (Tableau 4). Les deux modèles qui expliquent le moins de déviance sont ceux ajustés pour l'*Arabidion* et pour le *Seslerion* (32%). Il faut quand-même remarquer que, malgré la faible déviance expliquée, le modèle pour l'*Arabidion* présente des valeurs du test d'évaluation (ROC) assez élevées, ce qui n'est pas le cas pour le *Seslerion*.

Les graphiques des courbes de réponse des prédicteurs dont la réduction de déviance est significative, ainsi que les cartes de distribution pour les 7 alliances sont représenté dans l'annexe 1-7. On remarque de manière générale que les distributions reflètent assez bien, au moins en ce qui concerne l'altitude, l'amplitude écologique des alliances considérées (selon DELARZE *et al.* 1998).

Tableau 4. Prédicteurs retenus pour les modèles pour chaque alliance, avec la variance expliquée (VE) et les mesure d'évaluation ROC sur le modèle et sur le Jackknife (AUC et AUC'(coeff. de Gini)).

Alliance	Variables retenues								VE	Sur le modèle		Sur le Jackknife	
	taveyy	taveyy^2	swb	swb^2	sradyy	sradyy^2	slp25	slp25^2		AUC	AUC'	AUC	AUC'
Arabidion		***			***				0.32	0.92	0.83	0.90	0.80
Mesobromion	***					***	***		0.50	0.95	0.90	0.94	0.87
Nardion	*	***	***	***				***	0.40	0.91	0.82	0.90	0.79
Seslerion	***	***			*			***	0.32	0.87	0.74	0.86	0.71
Thlaspiion	***	*	***		***		***		0.61	0.97	0.95	0.96	0.91
Arrhenatherion	***							*	0.43	0.93	0.86	0.92	0.84
cynosurion	***	***	*		*	*		*	0.47	0.93	0.86	0.92	0.84

*** seuil de significativité < 0.001

* seuil de significativité < 0.05

4 DISCUSSION

Cette discussion se propose de passer en revue les 8 alliances définies avec l'analyse phytosociologique, d'interpréter les cartes obtenues et d'analyser les principaux problèmes rencontrés. Lors de cette étude, 10 groupes floristiquement homogènes ont été définis. Sur la base de leurs espèces caractéristiques, ces derniers ont été rattachés à une ou plusieurs alliances décrites dans la littérature. Pour 8 groupes, la détermination de l'alliance a été effectuée avec une certaine certitude, tandis que pour 2 d'entre eux la classification a été difficile, voir impossible. Huit alliances ont pu ainsi être définies ; *Mesobromion erecti* (52 relevés), *Nardion strictae* (63 relevés), *Seslerion* (55 relevés), *Cynosurion* (115 relevés), *Arrhenatherion elatior* (44 relevés) et *Thlaspion rotundifolii* (3 groupes pour un totale de 49 relevés), *Caricion firmae* et *Arabidion caerulae* (20 relevés). Dans un cas, la même alliance a été attribuée à plusieurs groupes (cf. *Thlaspion*), tandis que dans un cas, deux alliances (groupe 7 : *Caricion firmae* et *Arabidion caerulae*) ont été attribuées à un même groupe.

4.1 *Mesobromion erecti* (groupe 10)

Le groupe 10 a été rattaché à l'alliance du *Mesobromion erecti* grâce à la dominance de *Bromus erectus*. De plus, l'analyse discriminante a mis en évidence d'autres espèces, telles que *Sanguisorba minor*, *Daucus carota*, *Ranunculus bulbosus*, que l'on rencontre souvent dans ce type de milieu (Annexe 1a). Cependant, on peut aussi détecter des espèces liées à des milieux plus riches en nutriments (par exemple *Rhinanthus alectorolophus* et *Poa pratensis*), tel que l'*Arrhenatherion*. Ceci vient du fait que la transition entre un milieu et un autre est rarement nette, mais se fait par un gradient. Etant donné le type d'échantillonnage utilisé pour ce travail, statifié-aleatoire, il est fort probable que certains relevés tombent dans un tel type de gradient. Par conséquent, il s'avère probable que dans le groupe 10 soient présent des relevés qui représentent une transition vers une alliance proche. Pour cette raison, certaines des espèces, qui discriminent le groupe 10 ne sont pas strictement liées au *Mesobromion*.

Le *Mesobromion* est une prairie mi-sèche qui présente une strate herbacée de faible hauteur et parfois discontinue. Dans ce type de prairie, on observe souvent une richesse spécifique très élevée. En effet, le groupe 10, comparé aux autres, présente le plus grand nombre moyen d'espèce (42.56 espèces) (Tableau 3). Ce milieu à faible rendement se rencontre surtout dans des endroits ensoleillés, en partie avec un substrat calcaire car ceux-ci sont en général mieux

drainés et se réchauffent plus rapidement. Ces caractéristiques émergent aussi avec l'analyse GLM. En effet la probabilité de présence du *Mesobromion* augmente avec la température et les radiations solaires (Annexe 1b). La température moyenne, qui traduit indirectement l'effet de l'altitude, indique que le *Mesobromion* préfère les basses altitudes, tandis que les radiations suggèrent une prédilection pour les expositions sud (Annexe 1c). Cependant, on peut remarquer que les zones hautement prédites se trouvent confinées aux bords de la plaine du Rhone, juste aux pieds des montagnes. Ceci est le résultat de l'effet de la pente, qui influence positivement la présence de ce type de prairie (Annexe 1c). Sur la plaine, là où les pentes sont faibles, la probabilité de présence du *Mesobromion* diminue sous l'effet de l'intensification de l'agriculture (engraissement, irrigation). Avec une augmentation de la pente, l'exploitation agricole devient plus difficile et donc la probabilité de rencontrer du *Mesobromion* augmente. Pourtant la relation strictement linéaire entre pente et probabilité de présence n'est pas justifiée. En effet, lorsque la pente devient trop raide cette alliance diminue laissant progressivement la place à d'autres types de milieux, tel que le *Seslerion*. L'absence d'une relation quadratique pourrait être due au manque de relevés ayant une pente supérieure à 60°. Un tel type de données aurait probablement permis de détecter un effet quadratique de la pente.

4.2 *Nardion strictae* (groupe 6)

L'analyse discriminante a permis de rattacher le groupe 6 à cette pelouse maigre sur sol acide. Les critères qui ont permis de classer ce groupe dans l'alliance du *Nardion strictae* sont surtout la dominance de *Nardus stricta* et de *Plantago alpina* (Annexe 2a). D'autres espèces présentes dans ce type de milieu, telles que *Potentilla aurea* et *Gentiana purpurea*, ont été également mises en évidence par l'analyse. Comme dans le cas du *Mesobromion*, on observe, dans ce groupe, des espèces liées à d'autres alliances proches du *Nardion*. C'est le cas de *Festuca rubra*, *Poa alpina* et *Ligusticum mutellina*, qui se rencontrent le plus souvent dans des pâturages plus gras tels que le *Poion alpinae*. Ce fait n'est pas étonnant, vu que nombreux pâturages se composent d'un mélange d'espèces du *Nardion* et de pelouses plus grasses. En effet, la présence de formes de transition dans l'échantillonnage n'est pas exclue. Cette forme de transition peut être le symptôme d'une augmentation de calcaire dans le sol ou d'une utilisation plus intensive du terrain. Le groupe 6 présente un nombre moyen d'espèces de 36.14 (Tableau 3). En général, les pâturages maigres sur sol acides possèdent une richesse

floristique inférieure à celle des pelouses basophiles. Cependant, des variantes riches en espèces peuvent être rencontrées sur des sols décarbonatés issus de schistes calcaires.

L'analyse GLM a pu mettre en évidence trois facteurs principaux qui déterminent la probabilité de présence du *Nardion strictae* ; la température (*taveyy*), le bilan hydrique du sol (*swb*) et la pente (*slp25*) (Annexe 2b). Le *Nardion* présente un optimum de température d'environ 2°C (moyenne annuelle). La présence de *Nardion* diminue vers des températures plus élevées pour laisser la place à des alliances de basse altitude, telle que le *Cynosurion*. En revanche, lorsque la température diminue, le *Seslerion* est d'avantage observé. La sécheresse (faibles valeurs de *swb*) semble influencer négativement la probabilité de présence de ce type de pâturage. En effet, le *Nardion* préfère des sols assez profonds qui gardent une certaine humidité et où un certain lessivage des carbonates est possible. La présence du *Nardion* diminue avec une augmentation de la pente. Des fortes pentes amènent une instabilité du terrain qui entraîne une diminution de l'épaisseur du sol empêchant ainsi son installation en faveur du *Seslerion* et du *Caricion*.

4.3 *Seslerion* (groupe 9)

Le groupe 9 a été rattaché à l'alliance du *Seslerion*, grâce à la dominance de *Carex sempervirens* et de *Sesleria caerulea* (Annexe 3a). Cette pelouse occupe des pentes pierreuses calcaires, en général dans des situations ensoleillées. Elle présente généralement une grande richesse floristique, qui résulte en partie de la diversité des microhabitats liée à sa structure en gradins. Le groupe 9 possède une richesse moyenne de 35.85 espèces qui est seulement dépassée par celles du *Nardion* et du *Mesobromion* (Tableau 3). Les préférences écologiques du *Seslerion* ont pu être mises en évidence par l'analyse GLM qui indique une augmentation de la probabilité de présence avec les radiations, montrant ainsi une préférence pour les expositions sud bien ensoleillées, et la pente (annexe 3b et 3c). Comme dans le cas du *Mesobromion*, la réponse presque linéaire du *Seslerion* vis-à-vis de la pente est écologiquement difficile à interpréter autrement que par le manque de relevés avec une pente supérieure à 60°. En ce qui concerne la température, cette pelouse présente son optimum à environ 2.5°C, valeur qui, comparée à l'optimum du *Nardion*, reste légèrement plus haute (Annexe 3c et 2c). Cependant, une explication possible pourrait être liée à la grande amplitude écologique de la *Seslerie* Bleuâtre (*Sesleria caerulea*). En effet cette espèce, qui peut aussi être dominante dans des prairies de basse altitude, aurait amené à regrouper

également dans le groupe 9 des relevées appartenants à l'étage collinien-montagnard, avec comme conséquence un déplacement de la courbe de réponse à la température vers la droite.

4.4 *Cynosurion* (groupe 8)

Cette unité, abondante à l'étage montagnard, est parmi les plus résistantes à la pression du bétail et les mieux adaptées à une exploitation soutenue. Elle occupe des sols carbonatés, assez frais et fertiles. Les espèces dominantes trouvées dans la littérature, qui influencent la physionomie du milieu, sont *Cynosurus cristatus*, *Festuca rubra*, *Festuca pratensis*, *Trifolium repens*, *Lolium perenne*, *Prunella vulgaris* et *Bellis perennis*. Les quatre premières espèces ont pu être mises en évidence par l'analyse discriminante (valeur discriminante élevée) (Annexe 4a). D'autres espèces souvent présentes dans ce type de pâturage, telles que *Taraxacum officinalis*, *Dactylis glomerata* et *Alchemilla xanthochlora* ressortent également de l'analyse. Le groupe 8 possède une richesse moyenne de 35 espèces (Tableau 3). De manière générale, la flore du *Cynosurion* est pauvre et constituée d'espèces banales. Cette pauvreté est cependant souvent renforcée par les microreliefs dûs au passage répété du bétail qui, surtout sur les terrains en pente et un peu humides, permettent de diversifier les microhabitats.

Les variables ecogéographique retenues dans le modèle sont : *taveyy*, *swb*, *sradyy* et *slp25* (Annexe 4b). En ce qui concerne la température, le maximum de probabilité s'observe à environ 5°C. Cette valeur, liée à la limite supérieur de l'étage montagnard, est parfaitement cohérente si on la compare à celle observée pour le *Nardion* qui occupe généralement des terrains de l'étage subalpin (Annexe 4b et 4c). La variable *swb* influence positivement la présence du *Cynosurion*. En effet lorsque les terrains sont trop secs, il laisse la place à basses altitudes au *Mesobromion* et à haute altitude au *Seslerion*. Cependant la relation strictement linéaire est là encore difficilement explicable. En effet une diminution de la probabilité de présence serait attendue pour des hautes valeurs de *swb*.

Vis-à-vis des radiations, le *Cynosurion* présente un optimum à environ $6,2 \cdot 10^6$ kJ/jour/an. Cette quantité de radiations correspond, pour la zone étudiée, aux endroits sans exposition particulière, tels que les fonds des vallées. La probabilité de présence du *Cynosurion* diminue avec une augmentation de la pente. En effet lorsque les terrains deviennent raides, le *Cynosurion* est souvent remplacé par le *Mesobromion* (basses altitudes) ou le *Seslerion* (hautes altitudes).

4.5 *Arrhenatherion elatiori* (groupe 5)

Cette prairie de fauche de basse altitude, purement anthropogène, possède un tapis herbacé dense et continu. *Arrhenatherum elatius*, souvent dominant, est accompagné de nombreuses autres graminées de divers genres (*Alopecurus*, *Bromus*, *Dactylis*, *Festuca*, *Phleum*, *Poa*, ect.). Le groupe 5 a été rattaché à cette alliance par la présence de *Arrhenatherum elatius*, *Poa trivialis*, *Holcus lanatus*, *Trifolium repens*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis* qui présentent des valeurs discriminantes assez hautes (Annexe 5a). Pourtant, la présence d'espèces telles que *Lolium perenne* et *Cynosurus cristatus* laisse supposer l'existence, à l'intérieur de ce groupe, de relevés ayant une composition intermédiaire entre l'*Arrhenatherion* et le *Cynosurion*. Ce genre de transition s'observe surtout lorsque les prairies sont alternativement fauchées et pâturées. Le groupe 5 possède une richesse spécifique considérablement faible (23.61 espèces) (Tableau 3), alors qu'en général ce type de milieu est le plus riche en espèces végétales de toutes les prairies grasses. Cependant, des variétés pauvres en espèces sont observées lors d'une exploitation intensive accompagnée de coupes fréquentes.

Seulement deux variables ecogéographiques ont été retenues (sélection stepwise) pour expliquer la distribution de l'*Arrhenatherion*. La température exerce une influence positive linéaire sur la probabilité de présence de ce groupement. En effet, cette variable qui traduit indirectement l'effet de l'altitude, indique une préférence de l'*Arrhenatherion* pour les basses altitudes (annexe 1e carte). La probabilité de présence de cette prairie de fauche de basse altitude diminue avec la pente. En effet cette variable permet de discriminer les endroits occupés par l'*Arrhenatherion* de ceux occupés par le *Mesobromion*. Le premier purement anthropogène s'installe là où les pentes sont suffisamment faibles pour permettre une forte exploitation (fauche et fumure) tandis que le deuxième se réfugie là où les terrains sont trop pentus pour permettre un tel type de traitement.

4.6 *Thlaspion rotundifolii* (groupes 1, 3 et 4)

Trois groupes ont été rattachés à cette alliance typique des zones d'éboulis de l'étage alpin ; groupe 1, groupe 3 et groupe 4. Pour le groupe 4 et le groupe 1, l'attribution au *Thlaspion rotundifolii* n'a pas été difficile, surtout grâce à la présence de *Thlaspi repens* et *Linaria alpina*. En ce qui concerne le groupe 4, l'analyse discriminante a permis d'identifier d'autre

espèces, telles que *Cerastium latifolium*, *Pritzelago alpina*, *Poa minor* et *Galium Megalospermum*, souvent présentes dans ce type de milieu (Annexe 6a). La caractérisation du groupe 3 peut être discutable en raison de la présence d'une seule espèce discriminante (*Thlaspi repens*). Cependant, même si sa valeur est particulièrement basse, elle n'est dépassée que par les valeurs des groupes 1 et 4, indiquant ainsi une certaine fidélité à ce groupe. La difficulté d'assignation de ce groupe est très probablement liée au faible nombre de relevés qui le composent. Les trois groupes possèdent un nombre moyen d'espèces qui va de 1.16 (groupe 3) à 8.92 (groupe 4) ; valeurs qui reflètent bien les conditions parfois rudes de ce milieu (Tableau 3).

Les variables retenues pour le modèle sont : *taveyy*, *swb*, *slp25* et *sradyy* (Annexe 6b). La courbe de réponse du *Thlaspi* par rapport à la température montre un optimum à environ -4°C. Cette valeur est justifiée dans la mesure où elle correspond à la température moyenne annuelle enregistrée à l'étage alpin (Annexe 6c). La variable *swb* montre une diminution linéaire de la probabilité de présence avec l'humidité du terrain. Cette tendance peut être expliquée par une analyse plus attentive des espèces qui caractérisent les trois groupes. En effet, les espèces qui composent ces groupes suggèrent leur appartenance au *Thlaspietum rotundifolii*. Les éboulis correspondent à des zones où s'accumulent des matériaux pauvres en matière organique issus de l'érosion de pentes instables. Différents types d'éboulis, liées à différents types de végétation, peuvent être distingués en fonction de la nature chimique, de la granulométrie et de la mobilité du substrat. Le *Thlaspietum rotundifolii* présente une granulométrie assez grossière, ce qui fait de cette association un milieu assez sec. Dans des endroits où la granulométrie devient plus fine et d'avantage d'eau est retenue dans le sol, le *Thlaspietum* laisse la place au *Leontodontetum montani* ou à d'autres alliances telles que le *Drabion hoppeanae* ou le *Petasition paradoxi*.

Les radiations influencent négativement la présence de ce type de milieu. Pourtant, aucune explication valide n'a été trouvée pour interpréter cette tendance. Le même type de tendance a aussi été observé pour la pente. Dans ce cas également, il s'avère difficile d'interpréter la relation linéaire. En effet, même si d'une part il peut apparaître correct que la probabilité de présence diminue lorsque les fortes pentes causent une forte instabilité des éboulis, on s'attendrait également d'autre part à une diminution de la probabilité, là où les pentes deviennent suffisamment faibles. En effet, dans ces conditions, l'installation d'autres alliances telles que le *Nardion* sur les terrains acides, ou le *Caricion firmae* là où le calcaire persiste, est observée.

4.7 *Arabidion caerulae*/*Caricion firmae* (groupe 7)

Les relevés regroupés dans le groupe 7 ne peuvent pas être rattachés à une alliance de façon certaine. En effet ce groupe est caractérisé par des espèces de combe à neige (*Arabidion caerulae*), comme *Salix retusa* et *Ranunculus alpestris*, et par des espèces caractéristiques des pelouses calcaires sèches à laîche ferme (*Caricion firmae*), telles que *Silene acaulis*, *Festuca quadriflora*, *Carex sempervirens* et *Dryas octopetala* (Annexe 7a). Mise à part leur différence physiologie, écologique et floristique, ces deux milieux se trouvent très souvent liées spatialement. En effet, on observe souvent une alternance de dolines et bosses surtout sur les terrains modelé par un glacier. Les bosses présentent une composition de plantes adaptées à une période de végétation brève, entrecoupée de fréquentes intempéries, de gels fréquents et de périodes sèches. Les combes, caractérisées par des situations d'enneigement prolongé, possèdent un tapis de petites plantes à rosettes et de saules rampants (*Salix retusa*, *Salix reticulata*). Il s'avère donc probable que des relevés présentant une forme de transition entre des combes à neige et des pelouses sèches à laîche ferme soit présent dans le groupe 7.

En relation avec les conditions très sévères qui caractérisent ces deux types de milieu, le groupe 7 possède une richesse spécifique moyenne assez basse (20,56 espèces) (Tableau 3). L'analyse GLM a pu mettre en évidence 2 variables écogéographiques comme étant important pour modéliser la distribution de ces deux alliances (Annexe 7b). La réponse face à la température est quadratique et présente son optimum à environ 0°C. Cette valeur se situe entre celle trouvée pour le *Thlaspion* (-4°C) et celle trouvée pour le *Seslerion* (2.5°C). Les radiations influence négativement la présence de ces deux alliances. Il faut remarquer que cette relation semble plutôt liée à l'*Arabidion*, qui occupe des endroits plus protégés. Il est par contre difficile d'associer cette tendance au *Caricion* qui, d'une manière générale, occupe des terrains bien exposés.

4.8 Groupe non classés

L'analyse discriminante n'a pas permis d'attribuer le groupe 2 à une des alliances décrites dans la littérature. L'annexe 8 montre que 14 et 15 relevés ont été classés, sur le terrain, comme appartenant respectivement au *Caricion ferrugineae* et au *Petasition paradoxo*. Ces deux milieux partagent une caractéristique commune : l'humidité. Le *Petasition paradoxo* occupe des éboulis calcaires plus ou moins mobiles, situés au pied de pente et sur des cônes

d'alluvions, tandis que le *Caricion ferrugineae* occupe des pentes calcaires toujours bien alimentées en eau. Des formes de transition entre ces deux alliances ne sont pas exclues. En effet, sur des éboulis peu actifs et sur des cônes en voie de colonisation, on trouve des stades de transition vers des milieux fermés, notamment vers les pelouses du *Caricion ferrugineae*.

5 CONCLUSIONS

Globalement, la méthode utilisée pour caractériser les relevés a donné de bons résultats. En effet, cette approche qui utilise un système de groupement lié à une analyse discriminante permet une classification objective et rapide qui évite de passer par l'analyse individuelle de chaque relevé. Des limitations peuvent parfois se présenter si on exige une classification plus précise allant au-delà de l'alliance. Les principaux problèmes rencontrés concernent surtout les relevés qui se trouvent dans les zones de transition entre deux types de milieu. En effet ces relevés empêchent la formation de groupes homogènes du point de vue floristique. Ce problème se présente lorsque le plan d'échantillonnage est peu adapté à une analyse phytosociologique. D'habitude, en phytosociologie, la démarche consiste à effectuer de relevés à l'intérieur de surfaces plus ou moins grandes, homogènes et bien caractérisées. Cela qu'il n'a pas été le cas pour l'échantillonnage du projet MODIPLANT, qui vise à d'autres types d'analyses. En ce qui concerne la modélisation spatiale de alliance, les résultats ont été satisfaisants. De manière générale, on a pu remarquer un ordre cohérent du point de vue de la succession altitudinale des différentes alliances.

De plus, pour certaines zones de l'aire d'étude, des comparaisons avec des cartes de végétation (Clot *et al.* 1997) ont permis de tester la validité des modèles. Une bonne concordance a été remarquée, notamment pour certaines alliances telles que le *Seslerion*.

6 REMERCIEMENTS

En premier lieu je tiens à remercier le Prof. Antoine Guisan pour m'avoir offert la possibilité d'effectuer ce travail de diplôme, très enrichissant sous de multiples aspects, ainsi que pour son encadrement et ses précieux conseils tout au long du travail.

Je tiens à remercier Christophe Randin pour sa disponibilité et pour les nombreux conseils qui ont permis la réalisation de ce travail.

Merci à Pascal Vittoz pour son aide précieuse dans le domaine de la phytosociologie.

Je suis très reconnaissant à tous ceux qui ont participé à la récolte des données sur le terrain

Mes remerciements vont également à toutes les personnes avec lesquelles j'ai partagé ces six mois de travail. Un gros merci notamment aux « collègues » (Ruben Moresi, Pietro Persico, Roxanne Milleret, Virginie Favre) du labo SIG pour la bonne humeur qui ont su transmettre, ainsi que à Thomas Czaka toujours disponible.

Je tiens ensuite à remercier Olivier Broennimann et Simone Peverelli

Un gros merci s'adresse enfin à toute ma famille, qui m'a toujours soutenu et aidé.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Bénzécri, J.P. (1973). L'analyse des données. Vol. 2. L'analyse de correspondance. Dunod, Paris. 632 p.
- Clot, F., Hainard, P., Michel, C. (1992) Carte de la végétation du Pays d'Enhaut et de la place de tir du Petit Hongrin. Conservation de la nature, Institut de botanique systématique et géobotanique de l'Université de Lausanne et Laboratoire de biogéographie de l'Université de Genève.
- Delarze, R., Gonseth, Y., Galland, P. (1998). Milieux naturels de Suisse. Delachaux et Niestlé, Lausanne, 415 p.
- 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 Science*, 6, 85-96.
- Franklin, J. (1998). Predicting the distribution of shrub species in southern California from climate and terrain-derived variables. *Journal of Vegetation Science*, 9, 733-748.
- Géhu, J. M. & S. Rivas-Martinez (1981). Notions fondamentales de phytosociologie. *Syntaxonomie*, J. Cramer. Vaduz. 5-33.
- Géhu, J.M (1988) Colloques phytosociologiques : Phytosociologie et conservation de la nature (XV) Strasbourg 1987. J. Cramer, Berlin-Stuttgart 1988. p. 790.
- Higgins, S.I., Richardson, D.M., Cowling, R.M., Trinder-Smith, T.N. (1999). Predicting the landscape-scale distribution of alien plants and their threat to plant diversity. *Conservation Biology*, 13, 303-313.
- Leathwick, J.R. (1995). Climatic relationships of some New Zealand forest trees species. *Journal of Vegetation Science*, 6, 237-248.
- Pausas, J.G., Austin, M.P. (2001). Patterns of plant species richness in relation to different environments: An appraisal. *Journal of Vegetation Science*, 12, 153-166.
- Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A., Solomon, A.M. (1992). A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 19, 117-134.
- Thielen, R., Cosandey, A.C., Lussi, S., Roulier, C. (2003). Cartographie des zones alluviales d'importance nationale. *Tracés*, 18, 29-36.
- Tichy, L. (2002). JUICE, software for vegetation classification. *Journal of Vegetation Science*, 13, 451-453.
- Zimmermann, N.E., Kienast, F. (1999). Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: Species versus community approach. *Journal of Vegetation Science*, 10, 469-482.

Sites internet

Guisan 2002: <http://www.unil.ch/ecospat>

8 ANNEXES

Annexe 1 : Mesobromion erecti (groupe 10)

Annexe 2 : Nardion stricae (groupe 6)

Annexe 3 : Seslerion (groupe 9)

Annexe 4 : Cynosurion (groupe 8)

Annexe 5 : Arrhenatherion elatiori (groupe 5)

Annexe 6 : Thlaspion rotundifolii (groupe 1, 3 et 4)

Annexe 7 : Arabidion caeruleae / Caricion firmae (groupe 7)

Annexe 8 : Comparaison entre résultats de l'analyse et observations sur le terrain