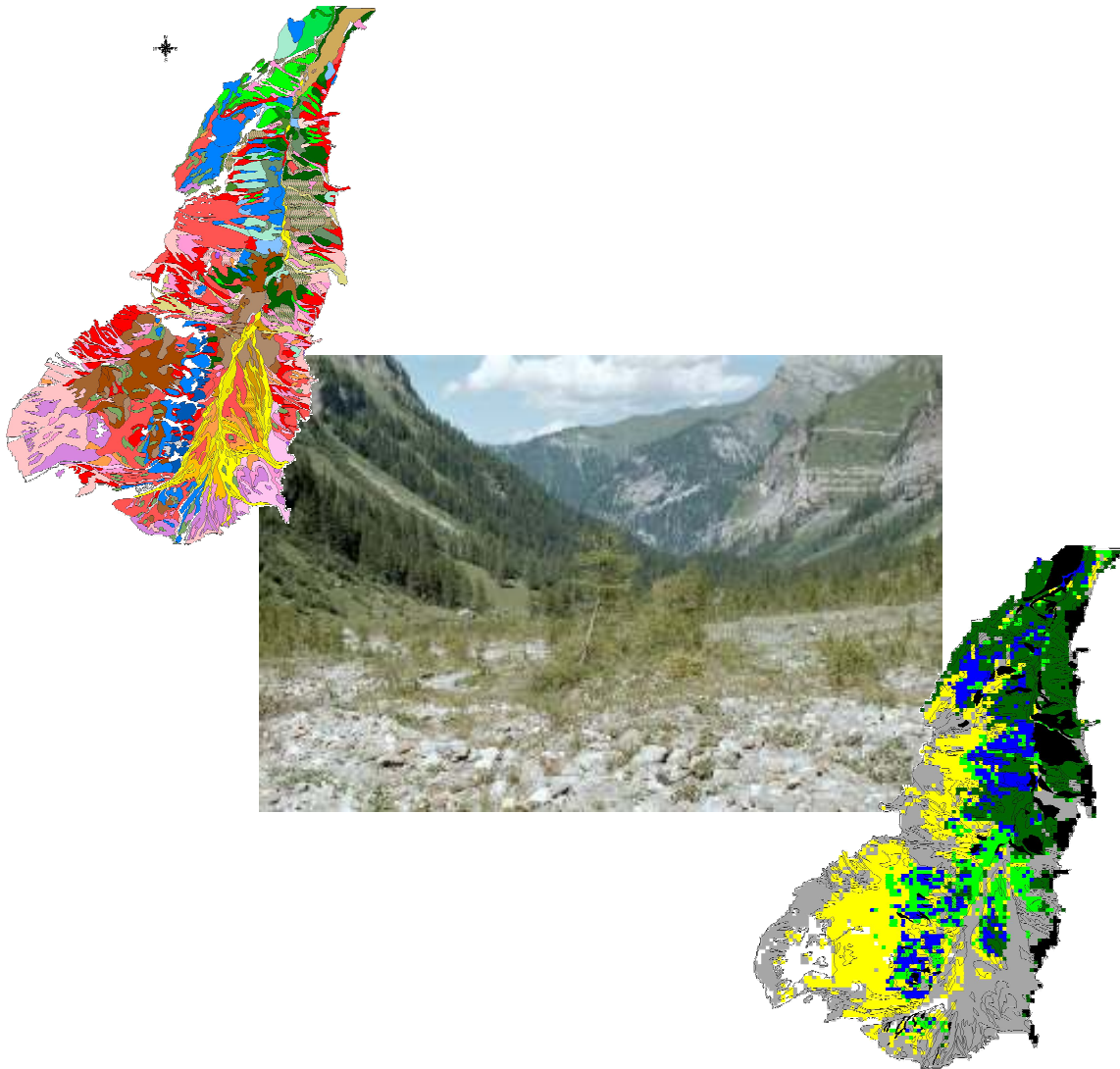


Télédétection et évolution de la végétation du Vallon de Nant

Travail de module d'Ecologie

IE-ZEA



par Imma Febbraro et Olivier Broennimann

sous la direction de Antoine Guisan

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Matériel et méthode.....	4
2.1 Digitalisation de la carte de relevé 77-78	5
2.2 Géoréférencage de l'image satellite 1984	5
2.3 Classification supervisée	5
2.4 Rastérisation de la carte de relevé	6
2.5 Comparaison de l'attribution des pixels entre la carte de relevé 77-78 rastérisée et les images satellites 84 classifiées	6
2.6 Comparaison de l'attribution des pixels entre les images satellites classifiées 84 et 99	6
3. Résultats.....	7
3.1 Digitalisation de la carte de relevé 77-78	7
3.2 Géoréférencage de l'image satellite 1984	7
3.3 Classifications supervisées	8
3.3.2 Choix des AOI	8
3.3.3 Classification « I » (forêt de conifère, végétation herbacée ou buissonnante)	8
3.3.4 Classification « II » (forêt de conifère, prairies, prairies printanières et aunaies)	10
3.4 Rastérisation de la carte de relevé	11
3.5 Mise en évidence des limites de la télédétection	12
3.5.1 Comparaison de l'attribution des pixels entre la carte de relevé 77-78 rastérisée et l'image satellite 84 classifiée « I »	12
3.5.2 Comparaison de l'attribution des pixels entre la carte de relevé 77-78 rastérisée et l'image satellite 84 classifiée « II »	13
3.6 Evolution de la végétation par comparaison des cartes 84-99	14
4. Discussion.....	15
4.1 Limite de télédétection	15
4.2 Evolution de la végétation	17
5. Conclusion.....	18
6. Remerciements.....	18
7. Bibliographie.....	19
8. Annexes.....	20

1. Introduction

L'évolution des techniques de télédétection basées sur des images satellites se sont considérablement améliorées au cours de ces deux dernières décennies. L'augmentation conjointe de la résolution spectrale et spatiale ont permis d'utiliser ces données pour cartographier et étudier la structuration de la végétation. Il est possible désormais de quantifier la distribution, l'abondance relative ainsi que la dynamique temporelle de groupements de végétation à grande échelle, en se basant sur leurs caractéristiques de réflectance spectrales.

Par rapport aux techniques classiques de cartographie de la végétation par relevés, cette méthode a l'avantage d'être rapide, peu coûteuse et de ce fait s'est révélée être un outil puissant pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes et pour évaluer et surveiller la biodiversité à l'échelle mondiale (Stoms 1993).

Tout en reconnaissant les avantages évidents de la télédétection, il faut néanmoins remarquer que cette approche n'est pas forcément compatible avec les méthodes d'écologie quantitative de description et de classification des communautés (Lewis 1998, Roughgarden 1991). En effet, seules les caractéristiques spectrales du couvert végétal sont restituées par les données satellites (Lees 1991). De plus, la densité de végétation a une grande influence dans ce type de données, ce qui n'est pas forcément le cas avec les méthodes classiques de relevés.

Le choix de la résolution spectrale et spatiale des images satellites est déterminant en fonction de la zone d'étude (Lees 1991).

La résolution spatiale des données satellites Landsat TM est actuellement de 30 mètres. Dans les paysages très fragmentés, cette résolution ne permet pas de distinguer certaines structurations de végétation présents sur le terrain ce qui peut induire des erreurs d'interprétation.

Nous avons choisis comme zone d'étude le vallon de Nant, une réserve naturelle couvrant une surface d'environ cinq km² située dans les Préalpes vaudoises à la frontière entre le canton de Vaud et du Valais. Cette zone se situe entre 1600 et 1800 d'altitude et présente une végétation de type subalpine.

D'une manière générale, l'exploitation de ce vallon n'a jamais été intense à cause d'un accès difficile. Cependant, l'exploitation forestière, liée à la fabrication des « tavillons » et surtout à l'industrie des Salines de Bex, a joué un rôle dans la physionomie de la végétation. Un enrichissement en feuillu de certaines parcelles était favorisé par des coupes sélectives en particulier parmi les conifères. Dans les taillis de zones d'éboulis, la végétation a été maintenue longtemps au stade buissonnant par l'action des ovins et des caprins. Ces derniers ont favorisé l'érosion (Ruchet 1971) et l'instabilité des roches par l'arrachement de touffes de plantes fixatrices de sols ainsi que l'abroustissement de bourgeons de jeunes arbres. Les ovins, quant à eux, ont favorisés par leur piétinement un tassement important des prairies diminuant, de ce fait, la perméabilité des sols (Hess 1942).

La richesse et l'état encore naturel des biotopes de ce vallon suscita l'intérêt des protecteurs de la nature, qui projetèrent sa protection. En 1970, la convention de mise en réserve fut signée (Matthey-Doret 1971). Suite à la création de cette réserve, un travail fut conduit afin de constituer un inventaire des principaux groupements végétaux et de préciser leur emplacement après la réduction de l'exploitation sylvo-pastorale (Dutoit 1983).

L'intérêt du travail de Annelise Dutoit était également de faire un état des lieux pour pouvoir suivre l'évolution de la végétation dans de futures études. Depuis la mise en place de la réserve de cette région, on suppose que la végétation a évolué vers un climax. Cette évolution peut potentiellement être mise en évidence à partir d'images satellites par des techniques de télédétection.

Les objectifs de ce travail sont (i) d'un point de vue méthodologique, tester les possibilités d'étude de la végétation à petite échelle grâce à des images Landsat TM et de mettre en évidence les limites de la télédétection dans une région subalpine et (ii) d'un point de vue écologique, mettre en évidence une éventuelle évolution de la végétation du vallon de Nant depuis sa mise en réserve.

2. Matériel et méthode

Nous disposons pour notre étude d'une carte de relevé établi en 1977-78 de la végétation du vallon de Nant ainsi que de deux images satellites Landsat TM du canton de Vaud (grid de référence 195-28) datant de 1984 (Landsat TM 5 n°354 prise le 23.07.1984) et de 1999 (Landsat TM 7 n°612 prise le 25.07.1999). L'image satellite de 1999 a déjà été géoréférencée par Ramona Maggini (Unil, IE-BSG) en utilisant une projection oblique de Mercator. Les caractéristiques spectrales et spatiales des senseurs Landsat sont indiquées dans la figure 2. La démarche générale adoptée pour atteindre nos deux objectifs est décrite dans la figure 1 :

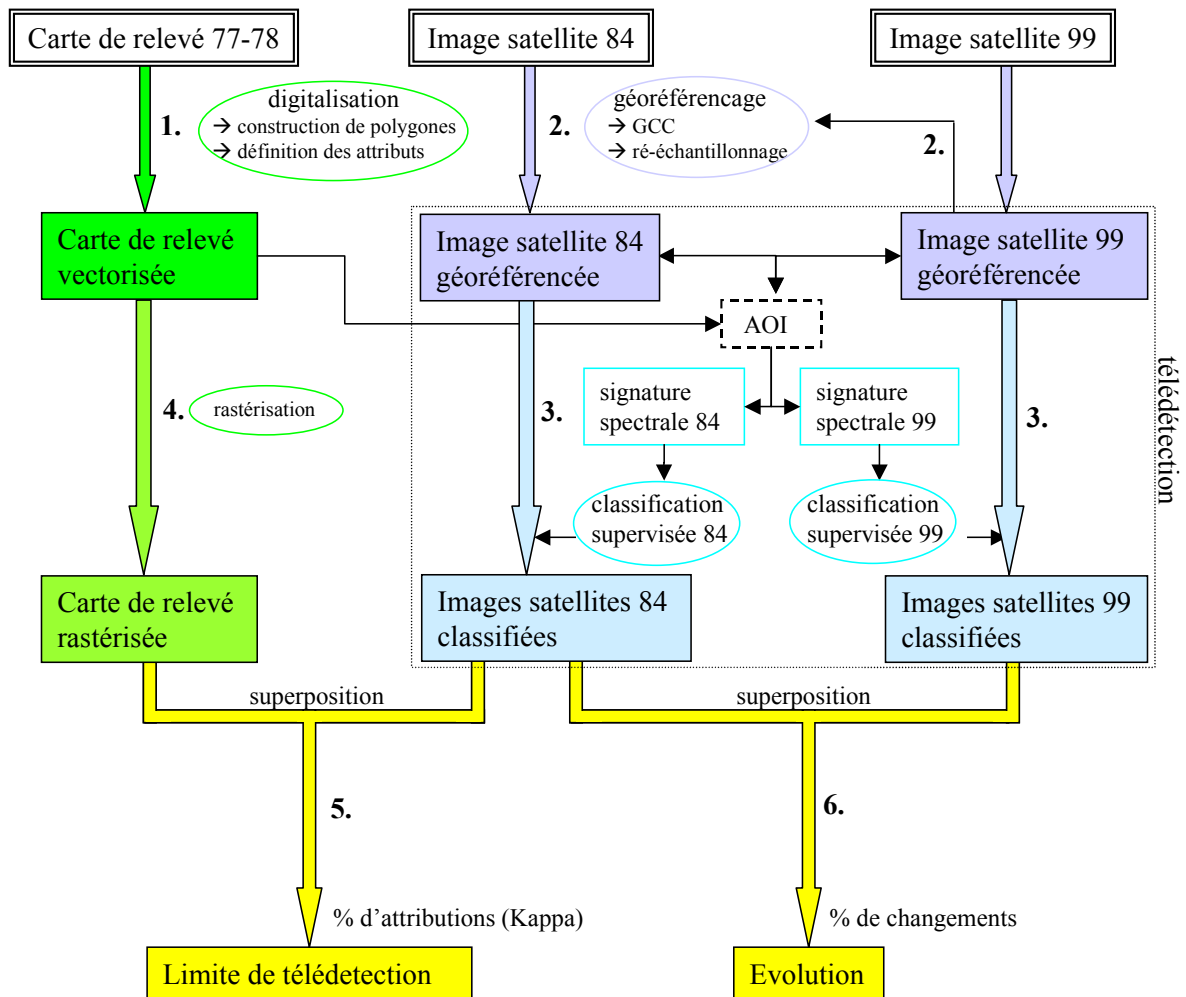


Fig. 1- Démarche générale de l'étude et méthodes utilisées. Les différentes étapes sont explicitées dans le texte
 1. digitalisation de la carte de relevé 77-78 2. géoréférencage de l'image satellite 84 grâce à l'image 99 déjà géoréférencée
 3. télédetection : (i) choix des groupements de végétation (ii) sélection des AOI (area of interest) dont la végétation n'a pas évolué de 77 à 99 (iii) calculs des signatures spectrales des groupements choisis (iv) classifications supervisées des images satellites 84 et 99 4. rasterisation de la carte de relevé simplifiée comprenant les types de végétation utilisées dans les classifications supervisées 5. mise en évidence les limites de la télédetection par comparaison de l'attribution des pixels entre la carte de relevé 77-78 rasterisée et l'image satellite 84 classifiée à l'aide de méthodes SIG 6. mise en évidence d'une éventuelle évolution de la végétation par comparaison de l'attribution des pixels entre les images satellites classifiées 84 et 99 à l'aide de méthodes SIG.

bande	longueur d'onde (µm)	résolution spatiales (m)
Band 1	0.45-0.52	30
Band 2	0.52-0.60	30
Band 3	0.63-0.69	30
Band 4	0.76-0.90	30
Band 5	1.55-1.75	30
Band 6	10.40-12.50	120 (landsat 7 : 60)
Band 7	2.08-2.35	30

Fig. 2 - caractéristiques spectrales et spatiales des senseurs Landsat TM 5 et 7

2.1 digitalisation de la carte de relevé 77-78

La carte de relevé 77-78 a été digitalisée en une couche vectorielle grâce au programme MapInfo 6.0 (MapInfo corporation). Cette couche est composée de polygones attribués aux différents groupements phytosociologiques présents sur la carte de relevé. Le calage de la carte digitalisée a été effectué en relevant les intersections des latitudes/longitudes de coordonnées suisses présentes sur la carte de relevé.

2.2 géoréférencage de l'image satellite 1984

Le géoréférencage a été effectué à l'aide du programme Imagine 8.5 (ERDAS Inc.) selon le modèle de correction géométrique Landsat en utilisant un modèle numérique d'altitude (MNT25, résolution : 25m). En se basant sur l'image satellite 99 géoréférencée, 31 couples de points de géoréférence (Ground control point : GCP) ont été répartis sur l'ensemble de l'image 99 ainsi qu'aux emplacements correspondants de l'image 84.

Les GCP sont des points de référence dans une image satellite correspondant à des coordonnées connues. Les GCP sont constitués de deux paires de coordonnées <X,Y> comprenant les données sources de l'image à géoréférencer et les données de référence de l'image déjà géoréférencée (ERDAS 1999, chap. 9, p.346).

La correspondance entre les deux cartes a été jugée suffisante lorsque la distance euclidienne moyenne entre les points correspondants (RMS) était inférieure à un, ce qui correspond à une erreur d'un pixel, soit 30 mètres sur le terrain. L'image satellite brute a été corrigée par la méthode de ré-échantillonnage du plus proche voisin (Nearest Neighbour). Cette méthode calcule les coordonnées transformées par rapport au système de coordonnée source. La transformation tient compte pour un pixel donné, le pixel le plus proche de la coordonnée transformée et assigne la valeur de ce pixel, au pixel dans l'image transformée (ERDAS Field Guide chap. 9, p.365).

Afin d'affiner le géoréférencage, un deuxième ré-échantillonnage a été effectué sur un sous-échantillon de l'image satellite 99 recadré sur la zone étudiée. Quatorze couples de points GCP ont été utilisés pour obtenir un RMS inférieur à un.

2.3 classification supervisée

La classification supervisée a été rendue possible grâce au programme Imagine 8.5 (ERDAS Inc.). Premièrement, nous avons affiché les images satellites en visualisant trois bandes spectrales 5, 4 et 3 combinées. Ces trois bandes respectivement représentées par les couleurs rouges, vert et bleu sont utilisées pour rendre les différents types de végétation visuellement distinguables (Tucker 1979). Dans un second temps, la couche vecteur a été superposée aux images satellites afin de délimiter les groupements de végétation.

De cette manière, le choix des différents groupements de végétation a pu être effectué par l'intermédiaire de leurs caractéristiques spectrales en s'aidant des contours vecteurs de la carte de relevé digitalisée. Nous avons ensuite sélectionné à l'intérieur des zones occupées par ces groupements, des AOI (area of interest) dont la végétation n'a pas évolué de 77 à 99. L'emplacement des AOI s'est fait sur toutes les zones où les groupements étudiés présentaient une surface suffisamment importante pour ne pas avoir évolué entre 1977 et 1999. En prenant ces AOI au centre des polygones ayant au moins dix pixels de diamètre, on s'assure que les signatures spectrales pris en compte pour chaque groupement de végétation soient représentatives des spectres de ces groupements. Les mêmes AOI ont été utilisées pour la classification des images satellites 84 et 99 afin que celles-ci soient comparables.

A partir de ces AOI, nous avons calculé les signatures spectrales de chaque groupement choisi et procédé à une classification supervisée paramétrique du type maximum de vraisemblance de manière indépendante sur les images satellites 84 et 99 géoréférencées. Cette classification attribue chaque pixel d'une image à un groupement de végétation en lui donnant une valeur numérique.

2.4 rasterisation de la carte de relevé

Grâce au programme ArcView 3.2 (ERDAS Inc.), nous avons combiné certains polygones de la carte de relevé afin de considérer les groupements de végétation utilisés lors de la classification. Nous avons ensuite rasterisé la couche vecteur grâce à la commande « convert to grid » pour obtenir des pixels d'une largeur de 30m, calés sur les images satellites. Chaque valeur de pixels a été déterminée en fonction de l'attribut de la plus grande surface de la couche vecteur : lorsque la surface d'un pixel de la grille de référence est remplie à plus de 50% par un polygone, l'attribut de ce polygone est donné au pixel (fig. 3).

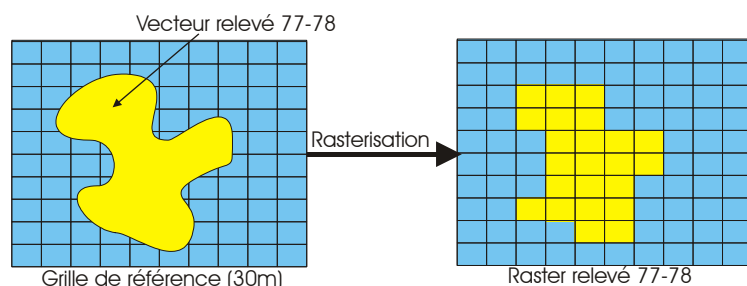


Fig. 3. procédé de rasterisation de la carte de relevé vectorisée

2.5 comparaison de l'attribution des pixels entre la carte de relevé 77-78 rasterisée et les images satellites 84 classifiées

Les valeurs de chaque pixels de la carte de relevé rasterisée 77-78 et des pixels correspondants de l'image satellite ont été additionnées par l'intermédiaire du programme Arc par la fonction :

grid : <carte composite> = 10 * < carte de relevé rasterisée > + <image classifiée>

Ce procédé permet d'obtenir une image où chaque changement de valeur de pixel entre la carte de relevé rasterisée et l'image classifiée peut être recensée. Cela permet également de savoir pour chaque pixel quel a été le type de transition de végétation entre les deux images, transition représentée par le passage d'un chiffre à un autre. En effet, les attributs de la carte composite, composés de deux chiffres, représentent le type de transition. Le premier chiffre indique le groupement de végétation dans la carte de relevé et le deuxième le groupement de végétation dans l'image classifiée (les multiples de 11 indiquent qu'il n'y a pas eu de changement). Les valeurs de changements ont été extraites sous Excel afin de construire une table de contingence des valeurs de pixels observées dans l'image classifiée en fonction des valeurs de pixels prédites par le raster relevé 77-78 (annexe x). Finalement, la valeur Kappa (Cohen 1960) et son intervalle de confiance ont été calculés dans S-Plus 2000 (fonction écrite par Bacon L.D) à partir de la table de contingence. Le Kappa mesure l'adéquation entre les valeurs observées dans une image et les valeurs prédites dans une autre. Cette valeur exprime le pourcentage d'accord maximum entre les deux images par rapport ce qu'il serait s'il était uniquement du au hasard.

2.6 comparaison de l'attribution des pixels entre les images satellites classifiées 84 et 99

Le même procédé évoqué au point 2.5 a permis de construire des images composites de changements de valeur de pixels entre les images satellites classifiées 84 et 99 avec la fonction :

grid : <carte composite> = 10 * <image classifiée 84> + <image classifiée 99>

A partir de cette carte composite, les changements de classes de chaque pixel correspondant entre les deux images classifiées ont pu être quantifiées en extrayant les valeurs de pixel de l'image composite et en calculant les surfaces des zones ayant changé de classe.

3. Résultats :

3.1 digitalisation de la carte de relevé 77-78

La carte de digitalisation comprenant tous les groupements de végétation de la carte de relevés 77 sous forme de polygones est présentée dans l'annexe 2. Chaque groupement de végétation a été attribué par un chiffre selon la légende. Pour notre étude, nous avons combiné les polygones des groupements de végétation utilisés lors des classifications.

3.2 géoréférencage de l'image satellite 1984

Le ré-échantillonnage de l'image satellite, effectué en deux temps, est basé sur une erreur RMS de 0.92 pour le ré-échantillonnage de l'image satellite entière et 0.83 pour celui de l'image recadrée sur la zone d'étude.

En superposant les contours de la carte de relevé digitalisée sur l'image obtenue (fig. 4) on observe une bonne correspondance entre les deux images. Les décalages entre les motifs de l'image satellite et les contours de la carte digitalisée sont rarement supérieurs à un pixel.

Bien qu'à cette étape, l'image ne soit pas interprétable formellement, on distingue visuellement cinq à six structurations spectrales correspondant à de grands ensembles de milieux homogènes. Cette information visuelle, intuitive, a été d'une utilité cruciale lors du choix de groupements de végétation à étudier (voir ci-dessous).

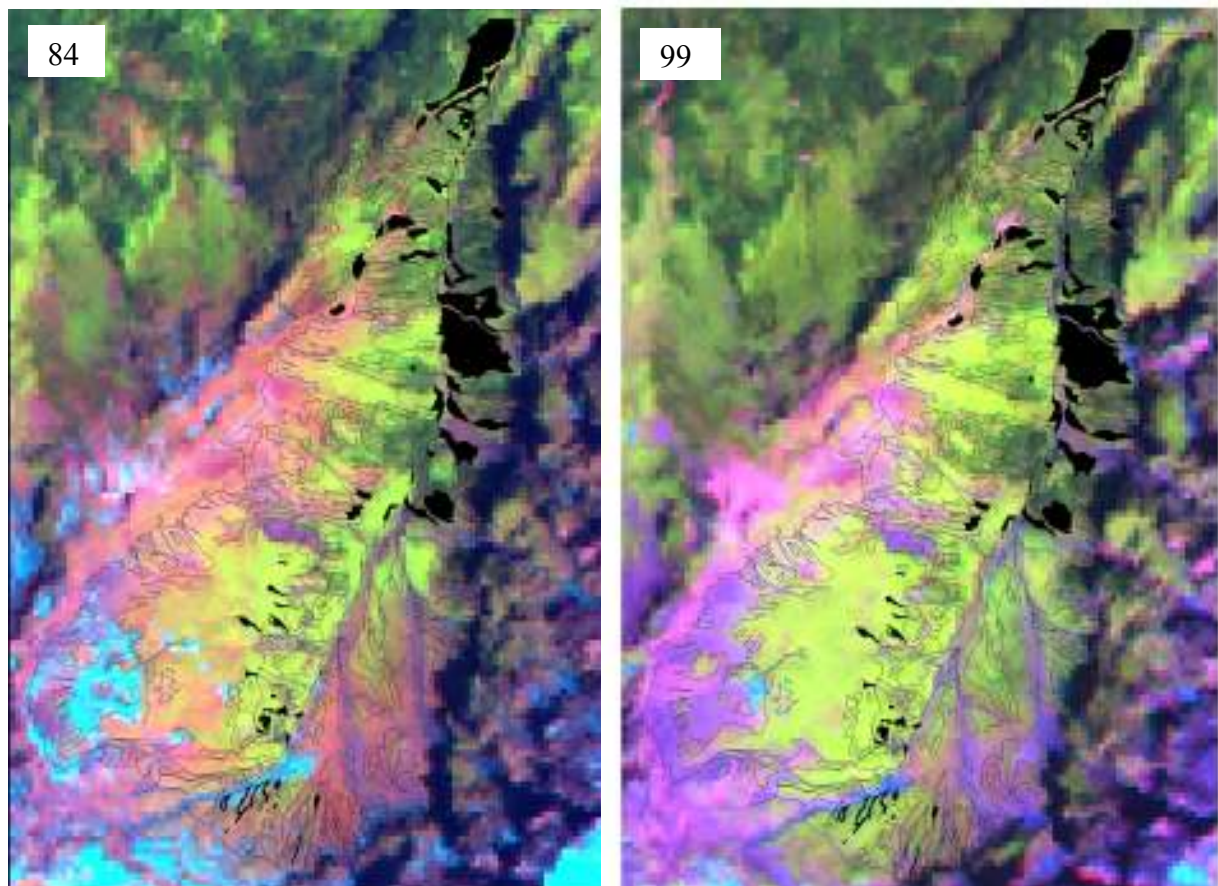


Fig. 4- Images satellites géoréférencées. Sonr représentées, à droite, l'image satellite 84 géoréférencée et à gauche l'image satellite 99 géoréférencée. Seules les bandes spectrales 5 (en rouge), 4 (en vert) et 3 (en bleu) sont représentées. Les zones en bleu clair traduisent la présence de neige. La carte de relevés 77-78 simplifiée est représentée en superposition. Les polygones en noir indiquent les zones non considérées dans l'étude (hêtraie-sapinière, gazons boisés, marécages et sources).

3.3 classifications supervisées

3.3.1 choix des groupements de végétation

Les images satellites visualisées en combinant les bandes spectrales 5, 4 et 3 (fig. 4) font d'emblée ressortir la structure générale de la végétation du vallon. La végétation (de jaune à vert foncé) contraste bien avec les zones avec peu ou pas végétation (rose à violet). On distingue également les zones enneigées (en bleu sur l'image 84) et d'ombre (brun foncé à noir). Par contre, les différences entre types de végétation sont moins évidentes. Les forêts de conifères (épicéa ou mélèzes) en vert foncé et les zones herbacées (pelouse, prairies et pâturage) ou buissonnantes (landes et aunaies) variant du jaune au vert clair, semblent se distinguer l'une de l'autre. Nous avons donc choisi ces deux groupements de végétation pour faire une première classification (voir classification « I » ci-dessous).

Les aunaies (en jaune-vert olive) se distinguent faiblement par des teintes intermédiaires entre les végétations herbacées et la forêt. Notons également que de grandes zones de pelouses ressortent en orange-brun sur l'image 84. Ces zones sont souvent situées à proximité de la neige. Nous en déduisons qu'il s'agit de pelouses printanières n'ayant pas eu le temps de se développer (Randin C., Vittoz P. Comm. Pers.).

Nous avons donc choisi de considérer également les aunaies et les pelouse printanières pour effectuer une classification plus fine (voir classification « II » ci-dessous).

3.3.2 choix des AOI

Dix-neuf AOI ont été sélectionnées pour établir les caractéristiques spectrales des groupements choisis pour la première classification (neuf pour les végétations herbacées ou buissonnantes et dix pour les forêts de conifères). Pour la deuxième classification vingt-six AOI ont été choisies (cinq pour les prairies développées, quatre pour les prairies printanières, dix pour les forêts de conifères et sept pour les aunaies).

Nous avons également délimité sept AOI pour les autres zones avec peu ou pas de végétation, trois pour les zones d'ombres et quatre pour les zones enneigées de l'image 1984.

Le nombre d'AOI et leur surfaces respectives sont présentées dans la figure 5. Certains groupements de végétation sont représentés par une surface totale d'AOI plus grande que d'autres. Ces surfaces étaient proportionnelles aux surfaces relatives de chaque groupement sur le terrain.

	autre	forêt	prairie	prairie printanière	aunaie	neige	ombre
1.	3019	6695	54196	21529	10234	20727	5515
2.	17705	3786	16774	17317	6644	22742	7646
3.	16583	3709	8825	60808	11510	49801	14530
4.	34898	10143	23178	309170	15900		17855
5.	28840	21502	30735		8738		
6.	16206	6970			23786		
7.	93535	25026			31674		
8.		11570					
9.		29352					
10.		8509					
total	210786	127262	133708	408824	108486	93270	45546

Fig. 5 – Nombre d'AOI et leur surface respective (en nombre de pixels) pour chaque classe de végétation. La surface totale pour chaque classe est calculée à la dernière ligne du tableau

3.3.3 classification « I » (forêt de conifère, végétation herbacée ou buissonnante)

Les signatures spectrales obtenues à partir de ces AOI montrent que chaque groupement possède des caractéristiques spectrales propres (annexe 1). Malgré un chevauchement spectral parfois important, on distingue des pics de fréquence différents pour chaque groupements. Les bandes 4, 5 et 6 permettent de distinguer particulièrement les forêts de conifères de la végétation herbacée ou buissonnante. Les bandes 1,2 et 3 mettent bien en évidence les différences spectrales des zones avec et sans végétation.

Notons également que les signatures spectrales de chaque groupement sont similaires entre 1984 et 1999 si l'on fait abstraction de la neige présente dans les signatures de l'image satellite 1984. La combinaison des bandes 1 à 6, maximisant l'écart entre les pics des signatures spectrales (likelihood), a permis d'attribuer chaque pixel des images satellites à une des cinq classes (fig. 6).

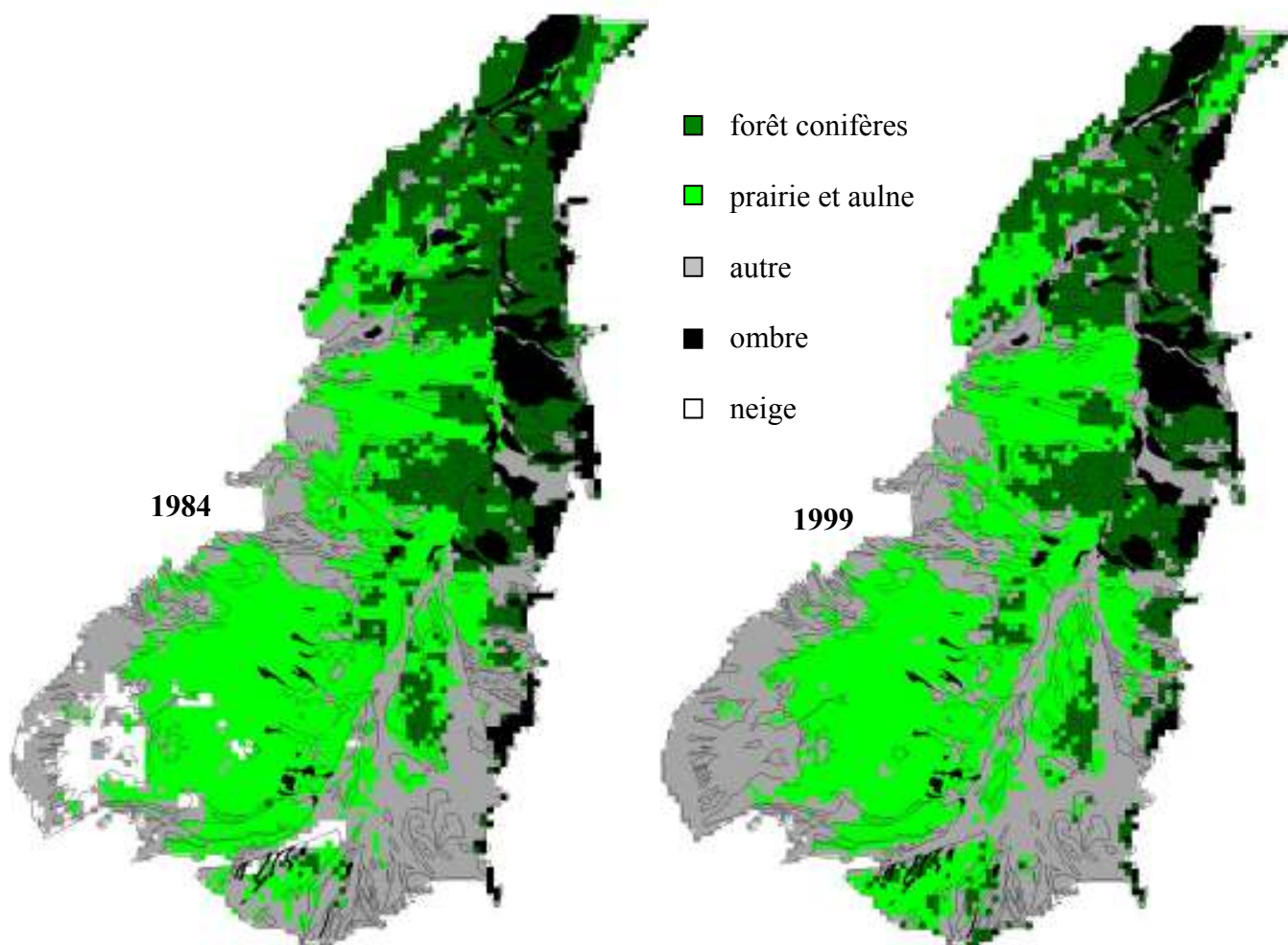


Fig. 6- Classification « I » pour les années 1984 et 1999 avec les contours de la carte de relevé 77-78 digitalisée simplifiée en superposition. Les polygones noirs représentent les groupements de végétation non étudiés.

L'image satellite 1984 classifiée possède 26 pourcents de sa surface totale attribuée à la forêt de conifères et 42 pourcents à la végétation herbacée ou buissonnante alors que respectivement 24 et 39 pourcents sur l'image satellite 1999 classifiée ont été attribués à ces mêmes groupements (fig. 7).

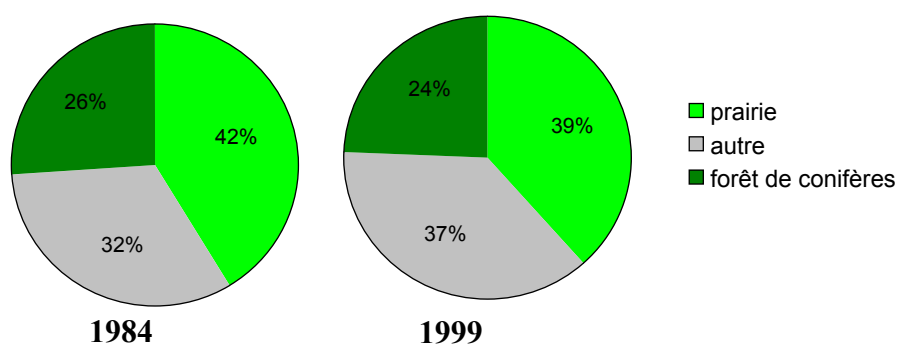


Fig. 7 - surfaces (en pourcentage de la surface totale) de forêts de conifères et végétation herbacée ou buissonnante selon la classification supervisée I pour les années 1984 et 1999

3.3.4 classification « II » (forêt de conifère, prairies, prairies printanières et aunaies)

Les signatures spectrales obtenues à partir des AOI montrent que chaque groupement possède des caractéristiques spectrales particulières mais avec un chevauchement plus important que pour la classification I, notamment entre les aunaies et les forêts de conifères avec les bandes 1, 2 et 3 (annexe 1). Ces deux groupement sont par contre bien distingués avec les bandes 4, 5 et 6. Notons également que les signatures spectrales de chaque groupement sont similaires entre 1984 et 1999 si l'on fait abstraction de la neige présente dans les signatures de l'image satellite 1984.

La combinaison des bandes 1 à 6, en maximisant l'écart entre les pics des signatures spectrales, a permis d'attribuer chaque pixel des images satellites à une des sept classes (fig. 8).

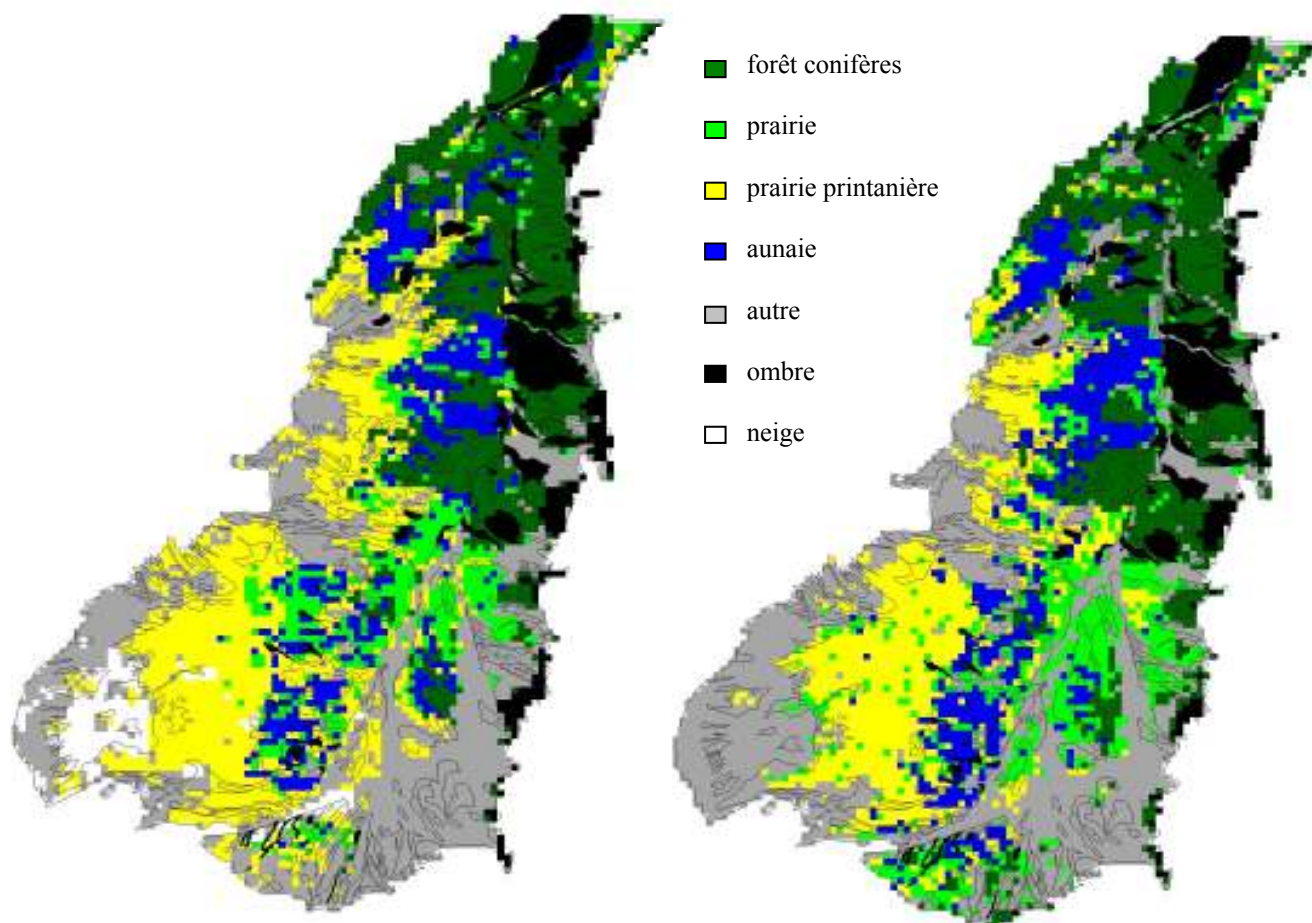


Fig. 8- Classification « II » pour les années 1984 et 1999 avec les contours de la carte de relevé 77-78 simplifiée en superposition. Les polygones noirs représentent les groupements de végétation non étudiés.

On observe que 23% de la surface totale de l'images satellite 1984 classifiée a été attribuée aux forêts de conifères, 36% aux prairies et 10% aux aunaies alors que respectivement 22%, 32% et 11% sur l'image satellite 1999 classifiée ont été attribuées à ces groupements (fig. 9). On remarque également que 26 % de la surface a été classée comme prairie printanière en 1984 alors que seul 18 % a été attribué à cette même classe en 1999.

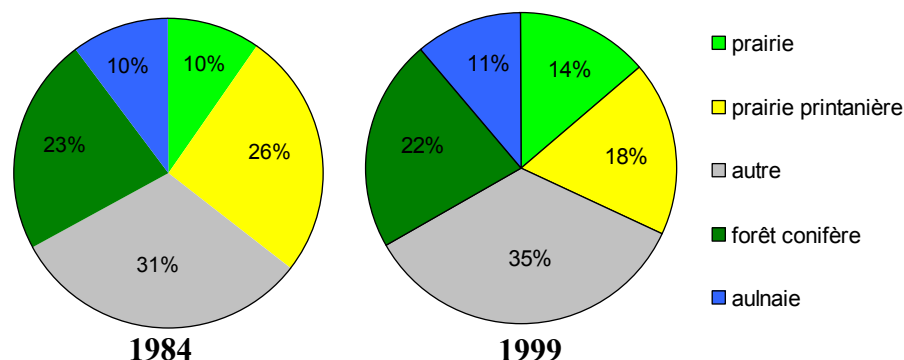


Fig. 9 - surfaces attribuées (en pourcentage de la surface totale) aux prairies, prairies printanières, forêts de conifères et aunaies selon la classification supervisée II pour les années 1984 et 1999

3.4 rastérisation de la carte de relevé

Le résultat de la rastérisation est présenté dans la figure 10. La comparaison entre les surfaces de chaque classe dans l'image vecteur et les surfaces correspondantes dans l'image raster met en évidence les imprécisions de la méthode (fig. 11). Les erreurs de d'attribution de surface s'échelonne de 1.6% pour les forêts de conifères à 21% pour la classe « autre ». L'erreur moyenne sur la surface totale du vallon est de 11.55%.

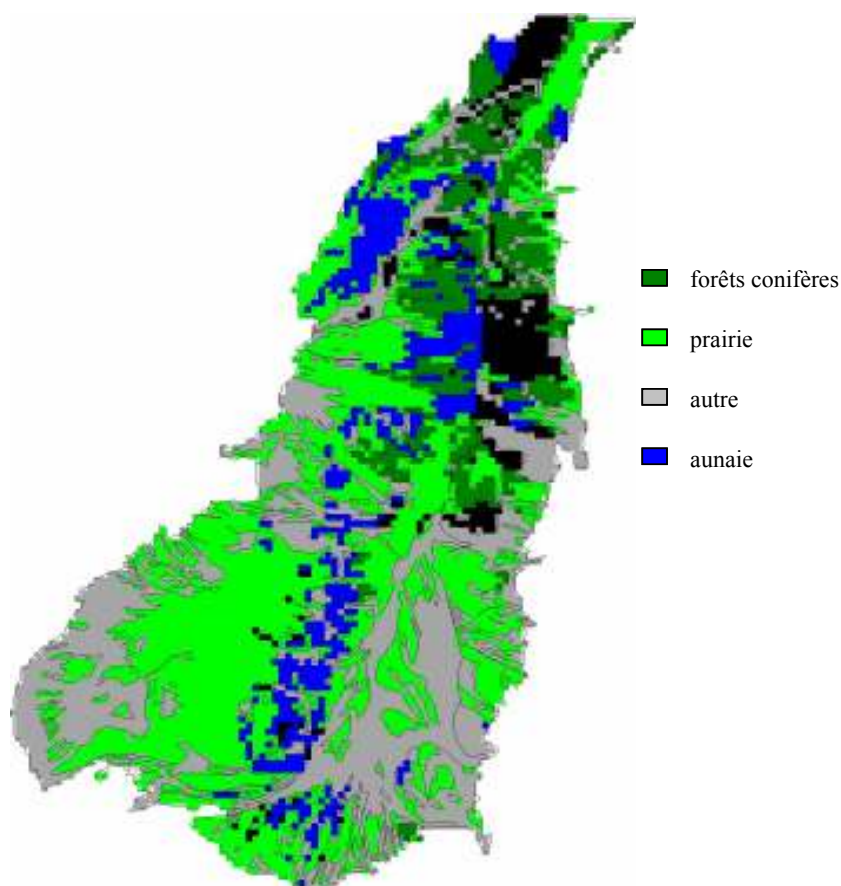


Fig. 10 -image raster de la carte de relevé 77-78. Les contours de l'image vecteur simplifiée sont représenté en superposition.

classe	surface (m ²)		erreur (%)
	vecteur	raster	
prairie	2436314.77	2278800	6.465288
forêt conifères	570180.585	560700	1.662734
aunaie	616854.995	578700	6.185407
autre	2252947	1779300	21.02344
total	5876297.375	5197500	11.55145

Fig. 11- comparaison entre les surfaces attribuées dans l'image vecteur et l'image raster de la carte de relevé 77-78

3.5 mise en évidence des limites de la télédétection

Les différences dans l'attribution des valeurs de chaque pixel ont été calculées entre la carte de relevé 77-78 et les images satellite 84 classifiée « I » et « II ».

3.5.1 comparaison de l'attribution des pixels entre la carte de relevé 77-78 rasterisée et l'image satellite 84 classifiée « I »

A partir de la carte composite des changements de valeurs de pixels, les pourcentages de surfaces correctement attribués dans l'image satellite 84 classifiée « I » par rapport à la carte de relevé rasterisée ont été calculés (fig. 12). Les surfaces correctement attribuées correspondent à 66% de la surface totale, tous groupements confondus. L'attribution de la prairie est à la base de la plupart des erreurs et contribue à elle seule à 22% de la surface totale. Plusieurs zones de prairies non pas été détectée par la classification et ont été attribuées à d'autres groupements de végétation. (11% de prairie attribuée à « autre » et 11% de prairie attribuée à la forêt de conifères).

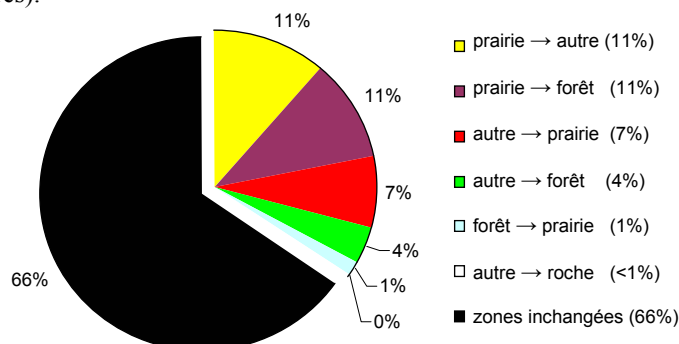


Fig. 12- Correspondances entre la carte de relevé 77-78 et l'image satellite 84 classifiée « I ». La surface (en pourcentage de la surface totale) correctement attribuée dans la classification « I » par rapport à la carte de relevé 77-78 est indiquée en noir. Les surfaces ayant été attribuées différemment dans les deux cartes sont indiquées en précisant le type de changement effectué.

La table de contingence (fig. 13) effectuée à partir de ces pourcentages a permis de calculer une valeur de Kappa de 0.44. L'intervalle de confiance est situé entre 0.42 et 0.46. Cette valeur correspond à un degré d'association modéré ($0.41 < \text{Kappa} < 0.6$) entre les deux images selon l'échelle standard de Monserud (1992). La significativité de la valeur Kappa n'a pas été calculée. Etant donné les grandes tailles d'échantillon impliquées (plus de 6000 pixels), presque n'importe quelles images seraient significativement différentes l'une de l'autre (Monserud 1992).

	prairie	roche	forêt	total
prairie	1836	614	568	3018
roche	385	1160	200	1745
forêt	77	24	498	599
total	2298	1798	1266	5362

Fig. 13- Table de contingence entre les surfaces (nb de pixels) prédites par l'image de relevé raster 77-78 et observées dans l'image 84 classifiée « I »

3.5.2 comparaison de l'attribution des pixels entre la carte de relevé 77-78 rasterisée et l'image satellite 84 classifiée « II »

Les surfaces correctement attribuées (fig. 14) correspondent à 59% de la surface totale, tous groupements confondus. L'attribution de la prairie est également à la base d'une part importante des erreurs d'attribution et contribue comme précédemment à 20% de la surface totale. Plusieurs zones de prairies n'ont pas été détectées par la classification et ont été attribuées à d'autres groupements de végétation. (10% de prairie attribuée à « autre », 6% à la forêt de conifères et 4 % aux aunaies).

La table de contingence effectuée à partir de ces pourcentages a permis de calculer une valeur de Kappa de 0.42. L'intervalle de confiance est situé entre 0.40 et 0.44. Cette valeur correspond également à un degré d'association modéré entre les deux images.

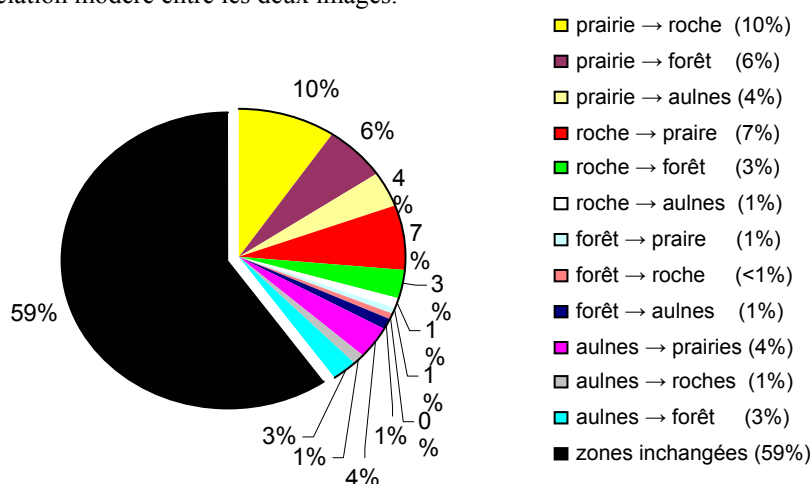


Fig. 14 - Correspondances entre la carte de relevé 77-78 et l'image satellite 84 classifiée « II ». Les surfaces (en pourcentage de la surface totale) correctement attribuées par rapport à la carte de relevé 77-78 dans cette classification sont indiquées en noir. Les surfaces ayant été attribuées différemment dans les deux cartes sont indiquées en précisant le type de transition effectuée.

	prairie	roche	forêt	aunaie	total
prairie	1358	512	326	198	2394
roche	373	1149	171	52	1745
forêt	53	22	462	62	599
aunaie	203	50	137	236	626
total	1987	1733	1096	548	5364

Fig. 15- Table de contingence entre les surfaces (nb de pixels) prédites par l'image de relevé raster 77-78 et observées dans l'image 84 classifiée « II »

3.6 évolution de la végétation par comparaison des cartes 84-99

La comparaison de l'attribution des pixels entre les classifications « I » et « II » 84 et 99 (fig. 16) montrent un pourcentage important de surfaces inchangées entre les deux dates. La classification « I », qui comprend quatre groupements de végétation, met en évidence 76.8% de surfaces n'ayant pas évolué, alors que la classification « II » comprenant six groupements de végétation, indique 69.8% de surfaces inchangées entre 84 et 99. La différence entre ces deux pourcentages est due aux évolutions prairie → aulne (4.4 %) et aulne → prairie (3.8 %). Si on ne tient pas compte de ces évolutions intrinsèques à la classification « I », le pourcentage de surfaces inchangées entre forêt et non forêt dans la classification « II » est de 77.0 %. Cette valeur est donc cohérente à 0.2% près avec la classification « I ». Les deux classifications sont donc cohérentes et transcrivent les mêmes surfaces de végétations. Les pourcentages de transitions d'un groupement de végétation à un autre sont faibles.

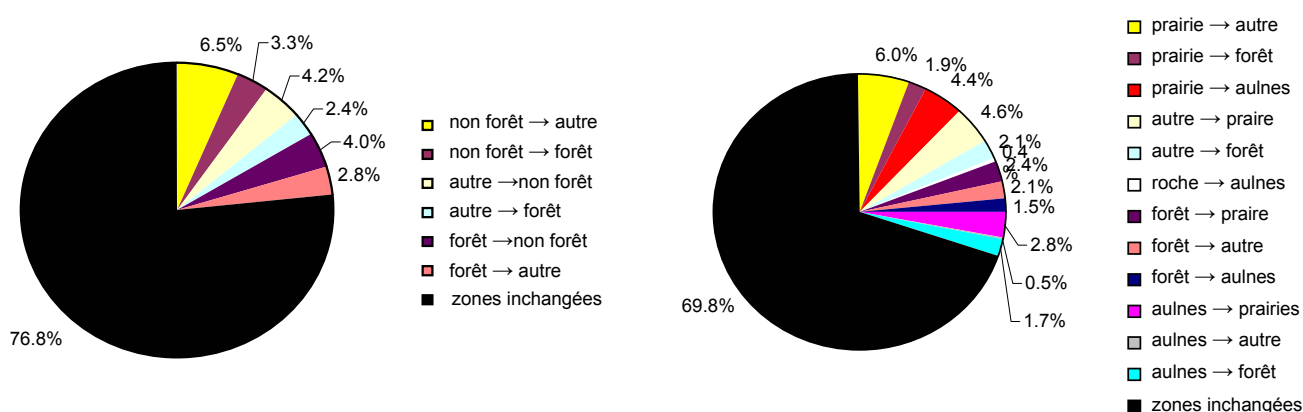


Fig. 16- évolution de la végétation entre 84 et 99 selon les classifications « I » et « II ». Les surfaces (en pourcentage de la surface totale) attribuées aux mêmes groupements de végétation sont indiquées en noir. Les surfaces ayant subi une transition de végétation sont indiquée par <groupement>₈₄ → <groupement>₉₉.

4. Discussion

4.1 Limite de télédétection

En comparant la carte de relevé rastérisée et l'image satellite 84 classifiée, il ressort que les surfaces correctement attribuées correspondent à 66% de la surface totale, tous groupements de végétation confondus. Cela correspond à une valeur de κ de 0.44 et indique un degré d'association modéré entre les deux images. Les raisons pour lesquelles nous n'obtenons pas un pourcentage plus élevé sont diverses (fig. 17).

Premièrement, un certain pourcentage de divergence est prévisible car la carte de relevé a été effectuée en 77-78 alors que l'image satellite a été prise en 84. Les premières images satellites Landsat TM datant de 1984, il n'était pas possible d'obtenir des images datant de la même période que le relevé. En six ans, la végétation a pu évoluer, mais il est très improbable que cela constitue une source d'erreur importante.

Une autre source de divergence prévisible provient de la différence de concept entre les méthodes de relevé et de télédétection. La première se base sur la phytosociologie et la deuxième sur les caractéristiques spectrales du couvert végétal. Les images satellites considèrent uniquement la strate la plus haute de la végétation, alors que la phytosociologie donne plus d'importance à la strate herbacée. Par exemple, dans certaines zones alluviales (annexe 2, classe 28) caractérisées par leur dynamisme (Randin C. Comm. Pers.), des mélèzes parviennent à survivre à faible densité. De ce fait, la classification phytosociologique attribue cette zone à la classe alluvion alors que la classification supervisée l'attribue à la forêt. Cette divergence d'interprétation ne peut pas être quantifiée avec nos résultats.

Une autre raison pouvant expliquer pourquoi nous n'obtenons pas un pourcentage d'attribution correct supérieur à 66% est que des erreurs ont pu s'accumuler aux cours des étapes de l'expérience.

Ces éventuelles sources d'erreurs peuvent être classées à trois niveaux : (i) au niveau de la création et du traitement de la carte de relevé, (ii) au niveau du traitement des images satellites et (iii) au niveau des classifications supervisées.

- (i) Trois sources d'erreurs potentielles peuvent être liées à la carte de relevé. Cette dernière a été établie par interprétation stéréoscopique d'une photo aérienne. Ce mode de prise de donnée sur la végétation a le désavantage de déformer l'image. La déformation est d'autant plus importante qu'on se situe dans une zone subalpine où l'altitude diffère d'un endroit à l'autre. La limite de la végétation peut être correctement délimitée au creux du vallon mais mal délimité au sommet pour cause de déformations dues à la lentille de l'objectif. Cependant, une telle erreur est de l'ordre de 5 à 10 mètres (Dubois A. Comm. Pers.) ce qui est bien en-dessous de notre résolution (30 m).

La digitalisation de la carte de relevé peut aussi apporter une source d'erreurs lors du traçage des limites de groupements de végétations. Cependant, cette imprécision semble être insignifiante. Le programme MapInfo nous permet d'agrandir à l'infini les limites des polygones de telle sorte que le tracé de nos propres polygones se confonde parfaitement avec la carte de végétation.

La rastérisation de la carte de végétation peut également apporter une source d'erreur importante, car elle dépend de l'emplacement de la grille de référence et de la taille des mailles de cette grille. Lorsque la carte de végétation rastérisée est calée sur les images satellites à une résolution de 30 m, les pixels prennent la valeur de la plus grande surface représentée. Ce processus diminue la précision de l'information contenue dans la carte de relevé originale. Le calcul de la différence de surface entre les polygones vecteur et les polygones raster montre une imprécision de 11% sur la surface totale. Deux pixels correspondants sur les deux images peuvent de ce fait avoir des valeurs différentes pour des raisons stochastiques. Cette source d'erreur est d'autant plus grande que la surface des polygones est petite et que la taille de maille est grande. Plus les mailles de la grille de référence sont petites, plus la probabilité que la somme des pixels couvrant les polygones corresponde à leur surface réelle est grande.

- (ii) Le géoréférencage peut également contribuer à une source d'erreurs non négligeable. L'image satellite 84 a été géoréférencée à partir de l'image satellite 99 déjà géoréférencée comportant une erreur RMS de 0.3 correspondant à une imprécision de 10 mètres (30×0.3). Cette erreur signifie que les GCP de l'image satellite 99 ne correspondent pas exactement aux points de référence sur une carte au 1:25000. Lors du géoréférencage de l'image 84, nous avons considéré que les GCP de l'image satellite 99 correspondaient exactement à la réalité sur le terrain. Ainsi, les erreurs provenant du géoréférencage 99 s'ajouteront à celles produites lors du géoréférencage 84.

De plus, il est difficile de faire correspondre exactement les GCP de l'image 99, déjà géoréférencée, à une image satellite brute. L'image 99 avait subi une distorsion après ré-échantillonnage. Un croisement de

route peut ressortir sur l'image 99 sur trois pixel alors qu'il ressort sur quatre pixel sur l'image encore non géoréférencée. Souvent, les images ne contiennent pas de points cibles ayant un diamètre de 30 m précisément. Cette remarque soulève le problème que les méthode de géoréférencage sont trop précises par rapport à la résolution des images satellites Landsat TM.

Rappelons enfin que le second géoréférencage de l'image satellite 84 a été effectué sur la zone du vallon de Nant uniquement. Cette région se trouvant en altitude, avec des reliefs assez importants, les nouveaux GCP ont été particulièrement difficiles à repérer, de par l'absence de route et de par le faible nombre de bâtiments. Il a donc été difficile d'obtenir une faible erreur RMS.

Le ré-échantillonnage constitue également une source d'erreurs. Le calage arbitraire de la grille impose des choix dans la réattribution des pixels. Un petit changement de calage pourrait entraîner des changements non négligeable de classification. Ces erreurs peuvent prendre de l'importance lorsqu'on travail à petite échelle et il serait intéressant de tester cela dans de futures études.

- (iii) Finalement, une dernière source d'erreur potentielle provient de la classification elle-même. Le choix des groupements de végétation pris en compte dans la classification est importante : il faut choisir un nombre de classe optimal afin que les différences spectrales propres à chaque groupement puissent être mises en évidence. Si le nombre de classe est trop élevé, la variance des signatures est grande et les spectres se chevauchent, ce qui ne permet pas de bien discriminer les différents type de végétation dans le processus de classification par la méthode du maximum de vraisemblance. La classification dépend également de l'emplacement et du nombre d'AOI. Notre choix dans l'emplacement des AOI n'est peut-être pas optimal. Cependant, en appliquant une classification non supervisée avec le même nombre de classes, on constate que les groupements de végétation sont distribués sur l'image satellite d'une manière aberrante. En revanche, les AOI dans la classification supervisée donnent des résultats proches de la réalité. Les AOI choisies sont donc représentatives de la végétation présente dans le vallon. Notre travail met donc en évidence que l'utilisation d'une classification supervisée tenant compte d'une information auxiliaire (par exemple une carte de relevé) permet d'améliorer considérablement la télédétection de la végétation en région subalpine.

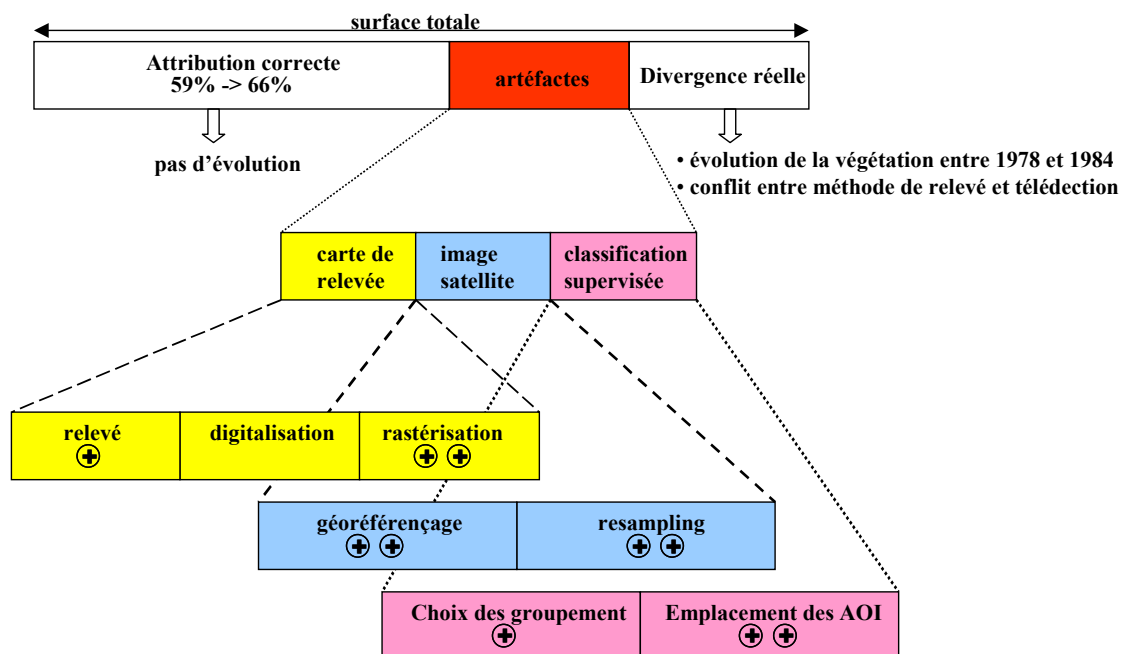


Fig. 17- Sources et propagations d'erreurs dans l'attribution des pixels. Les signes « + » indiquent la contribution présumée des différentes sources d'erreurs.

4.2 Evolution de la végétation

Les classifications supervisées ont permis d'estimer les pourcentages de surfaces occupées en 1984 par les forêts de conifères (23 à 26% respectivement pour la classification « I » et « II »), les prairies (36%) et les aunaies (10%). Ces pourcentages sont similaires aux résultats obtenus pour l'année 1999 (22 à 24% pour les forêts de conifères, 32% pour les prairies et 11% pour les aunaies). Au vu des limites de télédétection présentées ci-dessus, ces résultats doivent être considérés avec prudence.

Les comparaisons entre l'attribution des pixels des images satellites classifiées 84 et 99 selon les classifications « I » et « II » ont montré un pourcentage important de surfaces inchangées entre les deux dates (76.8% à 77.0% de surfaces inchangées entre forêt et non forêt et 69.8% en tenant compte des aunaies). Il a également été montré que les deux classifications définissent les mêmes unités de végétation à des emplacements très similaires en 1984 et 1999. Les classifications donnent donc des résultats cohérents.

Les pourcentages de changements d'un groupement à un autre doivent être considérés avec précaution. Ils peuvent signifier un changement réel de la végétation, mais également des attributions d'intensité spectrale différentes entre pixels correspondants dans les images 84 et 99. En effet, la trajectoire du satellite n'étant pas constante d'un passage à l'autre autour de la terre (celui-ci ne passe jamais au-dessus d'un même point cible), et la valeur spectrale d'un pixel étant une moyenne de la réflectance de 30x30m de végétation sur le terrain, ce phénomène peut induire une imprécision dans l'attribution des valeurs spectrales.

Comme la résolution est faible par rapport à la surface totale étudiée, l'importance de ce phénomène est certainement amplifiée. La corrélation entre les pourcentages de changement d'une transition de végétation et sa transition inverse est donc certainement expliquée par des raisons stochastiques liées à la trajectoire du satellite.

Les données de transition de végétation obtenues ne sont donc pas interprétables. Il y a pu avoir une certaine évolution, mais celle-ci se retrouve, dans tous les cas, confondue aux erreurs possibles de télédétection. Elle ne peut donc pas être considérée comme significative. Le constat que nous tirons de l'évolution de la végétation du Vallon de Nant entre l'année 84 et 99 est qu'il n'y a pas eu d'évolution majeure. Ce constat est appuyé par les dires des personnes visitant régulièrement la région (Dutoit A. comm. pers.).

L'effet conjugué des contraintes climatiques (présence de neige plusieurs mois par année, contrastes importants de températures journalières), géologiques (différents types de sols : flysch, schiste, calcaire, moraines et alluvions) et topographiques (relief très accidenté, exposition Sud et Nord), oblige la végétation à évoluer vers des adaptations morphologiques et physiologiques particulières (Dutoit A. 1983). Ce phénomène génère à long terme une flore spécialisée. Il en résulte une situation de climax stationnel où chaque groupement de végétation se cantonne dans l'aire de répartition qui lui est la plus favorable.

Certaines zones présentent un dynamisme important (Dutoit A. 1983), notamment les zones d'éboulis, d'alluvion et les couloirs à avalanches, mais les perturbations n'impliquent pas un changement significatif de la distribution des groupements de végétation à une échelle de 30m.

Notons que les prairies sont encore soumises à la présence de bétail à l'heure actuelle. Malgré l'abandon des ovins et caprins, cette présence exerce peut-être une pression suffisante pour maintenir la végétation à un stade herbacé sur les zones de pâturages. Une évolution de la composition floristique des prairies a certainement eu lieu mais ne peut pas être mise en évidence par la télédétection.

Précisons finalement que la production en milieu subalpin est extrêmement faible et que de ce fait, même si une évolution est en marche, 15 ans ne suffisent pas à la mettre en évidence.

5. Conclusion

Peu d'études ont utilisé des images satellites pour étudier la végétation à échelle locale. Ce travail est une des premières études qui met en évidence les limites de la télédétection à petite échelle dans une zone subalpine. Nous retiendrons particulièrement les points suivants:

1. En tenant compte de l'hétérogénéité des groupements végétaux et de la faible résolution des images satellites Landsat TM, nous avons pu effectuer des classifications cohérentes pour de grands groupements végétaux.
2. Nous avons montré qu'au moins 59% à 66% de la végétation est attribuée correctement grâce à la télédétection. Les sources d'erreurs ainsi que leur propagation au cours des étapes ont été identifiées.
3. Entre 1984 et 1999 aucune évolution majeure de la végétation du vallon de Nant n'a été mise en évidence par les méthodes de télédétection. Une évolution ne peut être exclue, mais n'est pas assez importante pour être discernable avec les méthodes utilisées dans cette étude.

7. Remerciements :

Tout d'abord un grand merci à Antoine Guisan qui nous a proposé ce sujet et sans qui le projet n'aurait pas pu être réalisé.

Merci également à Anne-Lise Dutoit pour nous avoir fourni la carte de relevée et des explications complémentaires autour d'un verre.

A Christophe Randin pour nous avoir suivi et encouragé durant tout le travail.

A Abraham Poitet, Pascal Vittot, Ramona Maggini et Eric Soller pour leurs conseils avisés

Et finalement à tout l'IE-BSG pour leur thé parfumé et leurs délicieux gâteaux.

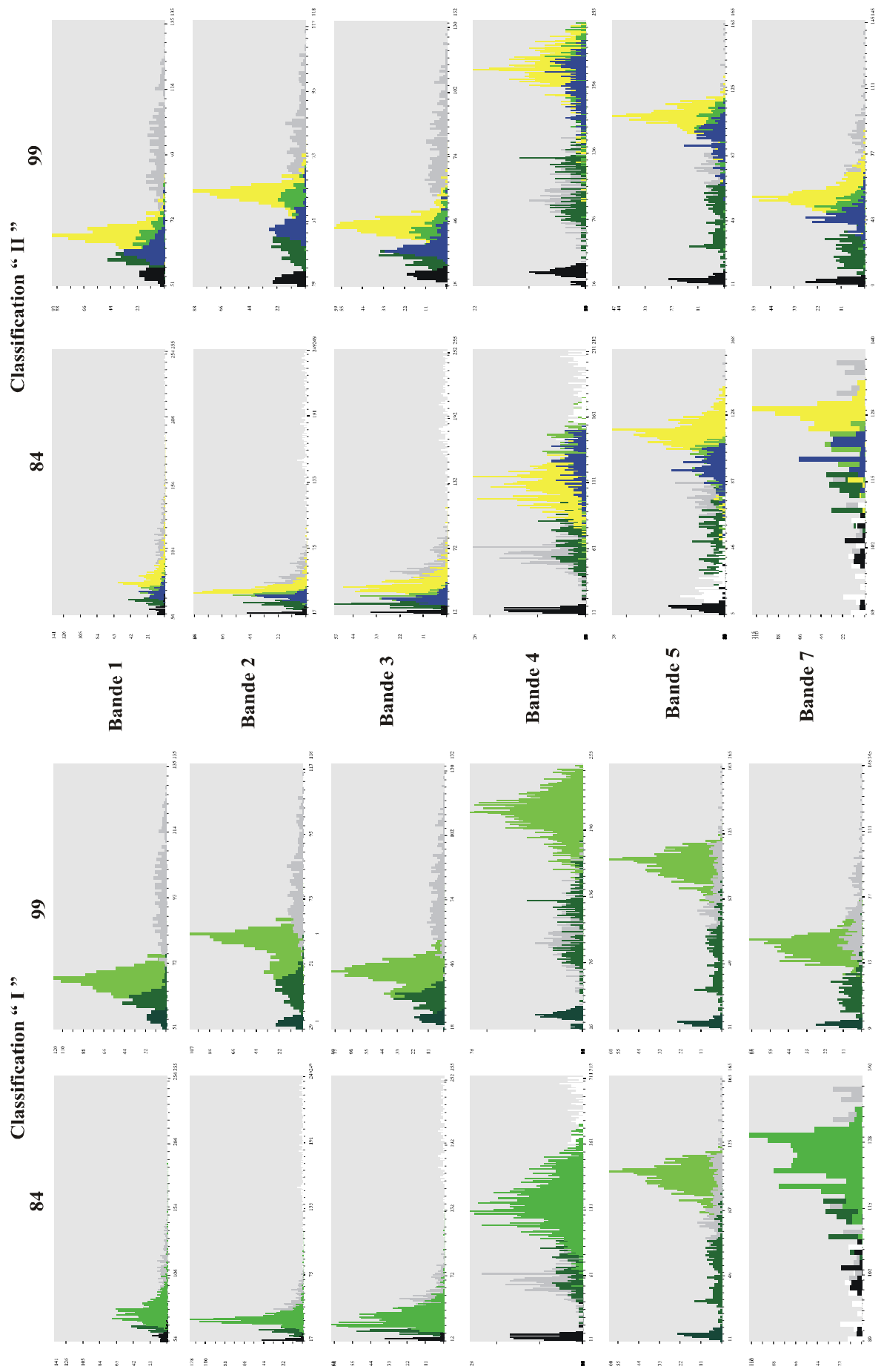
6. Bibliographie

- Cohen J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* **20(1)** : 37-46
- Dutoit A. (1983) La végétation de l'étage subalpin du vallon de Nant. *Section protection de la nature et des sites et Conservation de la faune du canton de Vaud*. Thèse de doctorat présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Lausanne.
- ERDAS (2001). Imagine 8.5. *ERDAS Inc.* Altanta. USA
- ERDAS (1999) Field Guide 5th edition chapitre 9. *ERDAS Inc.* Altanta. USA
- ESRI (1992-99) ArcGis 8.1 *Environmental Systems Research Institute*. Redlands. USA
- ESRI (1992-99) ArcView 3.2 *Environmental Systems Research Institute*. Redlands. USA
- Hess E. (1942) L'action de l'herbe dans les bassins de réception des torrents. *Journal Forestier Suisse* **93** :121-127
- Lees B.G. (1991) Decision-tree and rule-induction approche to inegration of remotely sended and GIS data in Mapping vegetation in disturbed or hilly Environments. *Environnemental Management* **15(6)**:823-831
- Lewis M.M. (1998) Numeric classification as an aid to spectral mapping of vegetation communities. *Plant Ecology*. **136**: 133-149
- MapInfo corporation (1985-2000). MapInfo professional version 6.0. *MapInfo corporation*
- Matthey-Doret B. (1975) Le Vallon de Nant. Mémoire de Géographie. *Non publié*. Ecole Normale. Lausanne
- Monserud R.A, Leemans Rik (1992) Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecol. Modelling* **62**: 275-293
- Roughgarden J., Running S.W, Matson P.A (1991). What does remote sensing do for Ecology *Ecology*. **72**:1918-22
- Ruchet D. (1971). Le mouton dans les Alpes vaudoises. *Journal Diana* **10** :289-294 et **11** :313-316 et 323
- Stoms D.M.,Estes J.E. (1993) A remote sensing research agenda for mapping and monitoring biodiversity. *Int. J. Remote Sensing*. **14**:1839-60
- Tucker C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing environment* **10** :127-150.

8. Annexes

8.1 Annexe 1- Signatures spectrales

Les signatures pour les classifications I et II basées sur les années 1984 et 1999. Les différentes bandes spectrales présent en compte lors des classifications sont également indiquées. Les graphiques représentent la fréquence de pixels en fonction de l'intensité spectrale (DN-value) Les spectres relatifs à chaque classe sont indiqués par les mêmes couleurs que celles utilisées dans les images classifiées (paragraphe 3.3).



8.2 Annexe 2 - carte de relevé 77-78 digitalisée

Le vecteur comprend tous les groupements de végétation de la carte de relevé de Annelise Dutoit (83)

