

La cartographie des végétations pâturées d'altitude par télédétection : un outil pour décrire leur diversité spatiale

J. Bernard-Brunet, A. Bornard

La connaissance de la biodiversité des végétations pâturées d'altitude est un enjeu majeur pour la gestion pastorale, dans un contexte de développement durable et de multi-usages. La caractérisation de l'hétérogénéité spatiale de ces végétations contribue à une meilleure analyse de leur usage possible par le pâturage et à une meilleure connaissance de leur biodiversité.

RÉSUMÉ

Le Cemagref de Grenoble a établi des modèles agro-écologiques pour de grands ensembles bio-géographiques de la montagne française. Dans un objectif d'inventaire spatialisé des milieux pastoraux d'altitude, on a établi une méthodologie d'identification et de cartographie à moyenne échelle des grands types de végétation, basée sur une approche mixant agro-écologie et télédétection. Ces travaux, appliqués sur le territoire de quatre Parcs nationaux, ont permis l'identification et la spatialisé de types physiognomiques de ces végétations. Sur la base de ces résultats, une deuxième série de travaux cherche à discriminer plus précisément la localisation de certaines formations pastorales spécifiques, par croisement sous SIG avec des données sur les caractéristiques des milieux.

MOTS CLÉS

Alpes, approche physiognomique, biodiversité, montagne, prairie, télédétection par satellite, typologie.

KEY-WORDS

Alps, biodiversity, grassland, highland, physiognomic approach, teledetection by satellite, typology.

AUTEURS

Cemagref, Agricultures et Milieux Montagnards, Domaine Universitaire, BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères ; jean.bernard-brunet@cemagref.fr

Introduction

Le domaine pastoral d'altitude (1 500 - 2 800 m) couvre en France plus de 2 millions d'hectares, dans des massifs très divers du point de vue bio-géographique. Le relief y est souvent très accentué et les formations végétales sont souvent organisées en continuum et en mosaïque du fait de l'imbrication fréquente de la végétation herbacée, des ligneux bas et du minéral. C'est le domaine des formations pâturées d'altitude, pelouses, landes et éboulis, enjeu majeur pour la gestion pastorale, dans un contexte de développement durable, de multi-usages et de gestion de la biodiversité. **Dans ces pâturages d'altitude, l'hétérogénéité spatiale des végétations est très grande**, conséquence des conditions naturelles et des pratiques. **La caractérisation de cette hétérogénéité contribue d'une part à une meilleure analyse de l'usage de la ressource pour le pâturage et, d'autre part, à une meilleure connaissance de la biodiversité** de ces milieux.

La connaissance et la gestion de ces milieux passe par l'identification de leurs végétations dominantes. Depuis une trentaine d'années, l'équipe "Écologie pastorale montagnarde" du Cemagref de Grenoble a mis en œuvre une méthodologie générale pour caractériser les formations pâturées de montagne par une démarche proprement agro-écologique, permettant une caractérisation de faciès agro-écologiques, à partir de relevés quantifiés de végétation et de la Valeur Pastorale (DAGET et POISSONET, 1969). Ces travaux ont abouti à l'établissement de **modèles agro-écologiques**, comprenant une vingtaine de types, pour de grands ensembles bio-géographiques de la montagne française (JOUGLET et COZIC, 1997) : Alpes Sud-occidentales (JOUGLET, 1999) ; Alpes du Nord (BORNARD et DUBOST, 1992 ; BORNARD et BASSIGNANA, 2001) ; Pyrénées centrales et occidentales (COZIC et BERNARD-BRUNET, 1991 ; BRAU-NOGUÉ, 2003).

La cartographie classique de ces modèles, à l'échelle du 1/5 000, nécessite un fort investissement de terrain pour une seule unité pastorale, compte tenu du niveau complexe de l'organisation spatiale des types agro-écologiques. C'est pourquoi, dans un objectif d'inventaire spatialisé des milieux pastoraux d'altitude sur des étendues de plusieurs centaines de milliers d'hectares, l'équipe du Cemagref a établi **une nouvelle méthodologie d'identification et de cartographie des grands types de végétation pastorale, basée sur leurs traits physionomiques analysés par imagerie satellitale** à haute résolution spatiale. En effet, si l'imagerie utilisée ne permet pas de discriminer les formations végétales herbacées définies qualitativement (Alliances, associations végétales...), ni *a fortiori* les espèces herbacées, il est en revanche possible d'identifier des variables descriptives communes entre les types agro-écologiques régionaux et certaines données radiométriques, en se basant sur les traits physionomiques dominants de ces végétations.

Une première série de travaux a permis de fonder cette méthodologie sur le territoire du Parc national des Écrins (CHERPEAU, 1996), puis de l'améliorer : alpages des Savoies, avec une application particulière au territoire du Parc national de la Vanoise (BERNARD-BRUNET *et al.*, 1999 ; BORNARD *et al.*, 1999, 2001), estives des Pyrénées centrales

et occidentales, avec application particulière au territoire du Parc des Pyrénées (BERNARD-BRUNET *et al.*, 2003 ; BRAU-NOGUÉ, 2003), alpages du Parc national du Mercantour (FRAT, 2002). Les produits principaux de ces travaux sont i) des typologies physionomiques des végétations pâturées d'altitude, pour lesquelles sont établies des correspondances avec les types agro-écologiques (une douzaine de types physionomiques pour les pelouses et landes, par massif), ii) une carte de ces types physionomiques, validée au 1/25 000 sur les territoires étudiés.

Sur la base de ces résultats en termes de "physionomie de la végétation", une deuxième série de travaux cherche à discriminer plus précisément la localisation de formations pastorales spécifiques, et ainsi de se rapprocher des types agro-écologiques. Il s'agit ici de croiser les cartes physionomiques avec des données caractéristiques des milieux, sous Systèmes d'Information Géographique (SIG). Un premier essai a été effectué dans le Parc national de la Vanoise (MOREL, 2001) ; un travail analogue est en cours dans le Parc national du Mercantour, dans le cadre du programme européen EON2000+, centré sur l'apport de la télédétection et des SIG pour la mise en œuvre de Natura 2000 (BERNARD-BRUNET et CLAUDIN, 2004a, 2004b).

Dans cet article, nous décrivons les principes méthodologiques mis en œuvre pour obtenir cette description physionomique spatialisée des végétations d'alpages par télédétection et nous illustrons en quoi cette description permet une analyse de leur diversité spatiale.

Problématique

■ Trois niveaux de perception des questions pastorales

A l'échelle d'un territoire de montagne (vallée, région, parc, réserve...), les questions pastorales qui nécessitent une connaissance de la répartition spatiale des végétations présentes peuvent schématiquement se décliner selon trois niveaux de perception :

- L'ensemble des unités pastorales de ce territoire (dizaines à centaines d'unités pastorales),
- L'unité pastorale (en moyenne de 50 ha à 500 ha),
- Le quartier de pâturage (fraction d'ha à dizaines d'ha).

A chacun de ces niveaux de perception correspondent des objectifs spécifiques : inventaires statistique ou cartographique, tableaux de bord, diagnostics pastoraux, suivis d'actions pastorales. A ces objectifs correspondent des outils d'investigations spécifiques, des exigences de connaissance plus ou moins fine des végétations pastorales. L'articulation sémantique et cartographique entre ces trois niveaux descriptifs s'avère de plus en plus nécessaire lors de la mise en œuvre des projets sur le terrain. La figure 1 illustre ces trois niveaux, pour le Parc national du Mercantour, dans une problématique de mise en œuvre de Natura 2000.

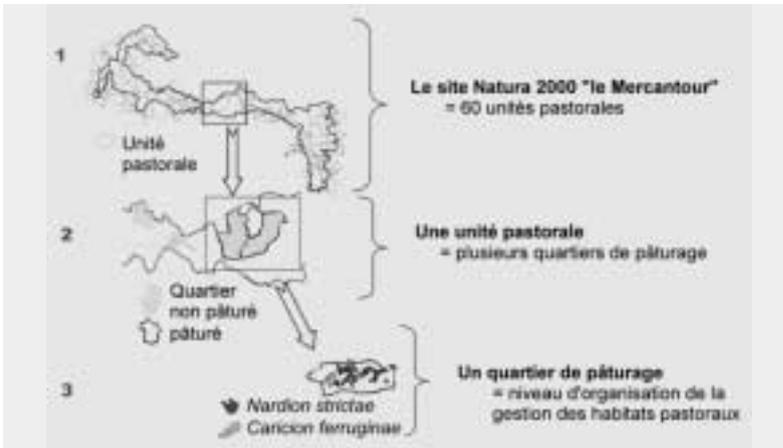


FIGURE 1 : Niveaux de perception des questions pastorales pour la mise en œuvre de Natura 2000, dans un parc national français (d'après FRAT, 2002).

FIGURE 1 : Perception level of pastoral questions for the implementation of Natura 2000 in a French National Park (after FRAT, 2002).

■ Trois approches pour décrire la végétation

Trois approches ont été privilégiées pour la description de la végétation supraforestière :

– **L'approche agro-écologique**, basée sur l'analyse quantitative et qualitative de la végétation et sur l'identification de faciès agro-écologiques. C'est la vision "potentiel pastoral" et "dynamique d'écosystème", telle que développée par le Cemagref. *Exemple : Pelouses subalpines ou alpines en festons ou gradins à Séslerie bleue et Avoine des montagnes.*

– **L'approche physionomique**, par télédétection, basée sur l'analyse du taux de recouvrement des différentes strates et de la densité de la phytomasse herbacée. C'est une vision "descriptive", cartographique, telle qu'introduite ci-dessus. *Exemple : les Pelouses ouvertes.*

– **L'approche phytosociologique**, basée sur la caractérisation de la composition floristique d'une communauté végétale, en référence aux classifications phytosociologiques. C'est notamment la vision "patrimoine naturel" retenue par Natura 2000. De nombreux programmes centrés sur la connaissance et la protection de la biodiversité des milieux sont basés sur le niveau phytosociologique. Le projet Natura 2000, au travers de la Directive Habitats (Directive 92/43 ; Natura 2000, 1999), s'appuie sur la nomenclature européenne Corine Biotope (Corine Biotope Manual, 1991), et privilégie l'Alliance et l'Association comme niveaux descriptifs pour les formations herbacées naturelles. *Exemple : Le Seslerion variaie (Alliance).*

Les "unités de végétation" qui sous-tendent chacune de ces trois approches (groupements, faciès, types) peuvent être caractérisées et comparées en termes de finesse des définitions, d'universalité des définitions, de quantification (peuplements et/ou phytomasse) et de facilité de cartographie sur de vastes étendues. Sur ces critères, on peut dire schématiquement que les unités phytosociologiques sont les plus universelles, les faciès agro-écologiques sont les plus fins (niveaux Association végétale ou sous-partie d'Association), et que les types physionomiques sont caractérisés par une bonne quantification et une facilité à être cartographiés par photos aériennes ou satellitales.

Identification et cartographie par télédétection des types physiologiques des végétations d'alpages

1. Bases méthodologiques

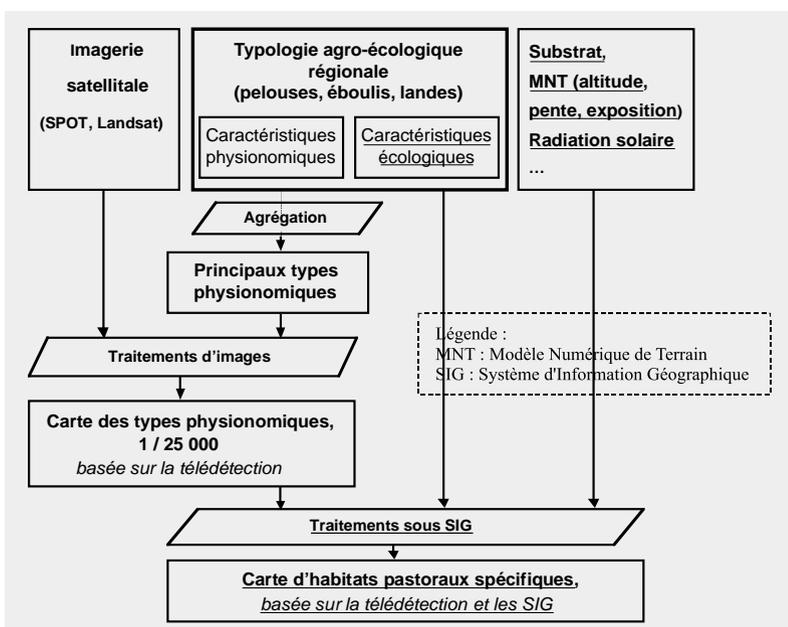
Cette approche s'appuie sur le **croisement de deux sources d'information** : la **typologie agro-écologique régionale** d'une part, **les données radiométriques satellitaires** d'autre part (figure 2a), **en analysant les traits physiologiques de la végétation**. Un postulat était d'accepter une moindre précision pour la caractérisation écologique et pastorale des types physiologiques obtenus (BERNARD-BRUNET, 2000), car la méthode procède par simplifications et agrégations.

Les images satellitaires utilisées permettent de couvrir de grandes étendues : une image SPOT couvre 60 x 60 km, une image LANDSAT 180 x 180 km. La dimension des pixels est de 20 x 20 m pour SPOT et de 30 x 30 m pour LANDSAT. Cette résolution spatiale et la dimension des formations pastorales de montagne ont conduit à retenir l'échelle du 1/25 000 pour la validation des cartes physiologiques finales.

La démarche nécessite **l'enchaînement de plusieurs phases** : agrégation de types agro-écologiques, sélection des données satellitaires les plus pertinentes, choix des méthodes de classification d'images,

FIGURE 2 : Les principales phases de la cartographie des végétations d'alpages couplant modèles agro-écologiques, télédétection et SIG (figure 2a : non souligné, 2b : souligné).

FIGURE 2 : Main stages of the cartography of highland vegetations using an approach mixing farm ecological models, teledetection and SIG (figure 2a : not underlined; figure 2b : underlined; SIG : geographical information systems).



validations. Pour l'entrée télédétection, les phénomènes analysables dans les longueurs d'onde choisies (visible, infrarouges proche et moyen) sont principalement : la présence ou l'absence de végétation, les différentes strates de végétation, un gradient de quantité de phytomasse chlorophyllienne, le taux de recouvrement au sol de la végétation et du minéral (cailloux, rochers, sol nu), un phénomène d'ambiance lié à la teneur en eau des milieux et de la végétation. En zone de montagne, les choix techniques doivent prendre en compte les contraintes suivantes, plus ou moins fortes selon les massifs : importance en surface des zones d'étude, importance du relief, importance du dénivelé, importance des prélèvements d'herbe par le pâturage.

2. Les types physiologiques obtenus

Les types physiologiques établis s'organisent selon un gradient de productivité et de recouvrement : du minéral stérile à la végétation chlorophyllienne la plus productive. Pour le supraforestier, et hormis les "neiges éternelles" et les surfaces en eau, ces types physiologiques se répartissent en **quatre grandes catégories de formations** : les éboulis stériles ou faiblement colonisés, les formations mixtes végétal / minéral, les pelouses, les formations ligneuses. **Chaque type physiologique est défini par les caractères** suivants :

- le taux de recouvrement de la strate herbacée ou ligneuse,
- l'importance de la phytomasse herbacée,
- des caractéristiques écologiques : étage de végétation, exposition, topographie, profondeur et hygrométrie du sol,

TABLEAU 1 : **Caractéristiques des types physiologiques. Exemple des Alpes du Nord externes** (d'après BORNARD *et al.*, 2001).

TABLE 1 : **Characteristics of the physiognomical types. Example from the Outer Northern Alps** (after BORNARD *et al.*, 2001).

Types physiologiques	Code	Recouvrement de la strate herbacée (%)	Production de phytomasse herbacée (t MS/ha)	Potentiel théorique fourrager de pâturage (UFL/ha)
1 Barres rocheuses	ROCO	0	0	0
2 Rochers	ROC1	0	0	0
3 Rochers / éboulis stériles	ROC2	< 10%	0	0
4 Éboulis faiblement colonisés	E1	10 - 20%	< 0,2	-
5 Éboulis assez bien végétalisés	E2	20 - 50%	< 0,5	20 - 100
6 Formations mixtes : herbacé / minéral	HM	50 - 70%	0,3 - 1	150 - 250
7 Pelouses ouvertes	P1	70 - 90%	0,5 - 1	150 - 300
8 Pelouses rases	P2	80 - 100%	0 < ,5	250 - 400
9 Pelouses de production médiocre	P3	90 - 100%	0,5 - 1,5	350 - 700
10 Pelouses de production moyenne	P4	90 - 100%	1,5 - 2,5	500 - 750
11 Pelouses de production forte	P5	100%	2,5 - 3,5	1200 - 1450
12 Pelouses de très forte production	P6	100%	3 - 4	1900 - 2200
13 Pelouses de forte ou très forte production pâturées	PP5	90 - 100%	< 2	-
14 Landes ouvertes	L1	< 50%	-	150 - 300
15 Formations mixtes : Landes avec minéral	L2	60 - 70%	< 0,5	< 180
16 Landes denses	L3	-	-	-
17 Aulnaies / feuillus d'ubac	AN	-	-	-
18 Aulnaies / feuillus d'adret	AS	-	-	-
19 Résineux lâches	FR1	-	-	-
20 Résineux denses	FR2	-	-	-
21 Eaux	EAU	0	0	0
22 Glaciers, névés	NEIGE	0	0	0

TABEAU 2 : Correspondances entre la typologie physiognomique et la typologie agro-écologique des alpages. Un exemple dans les Alpes du Nord externes (d'après BORNARD *et al.*, 2001).

Types physiognomiques	Typologie agro-écologique des Alpes du Nord externes
Pelouses de très forte production (en phytomasse produite)	- Pelouses grasses fraîches - Pelouses grasses fraîches calcicoles - Pelouses grasses humides - Pelouses grasses nitrophiles
Pelouses de production forte (en phytomasse produite)	- Pelouses moyennes humides - Pelouses grasses neutres

TABLE 2 : Correspondences between the physiognomical typology and the agro-ecological typology of highland grazings. Example from the Outer Northern Alps (after BORNARD *et al.*, 2001).

- le type de végétation qui s'y développe. Pour les types physiognomiques de pelouses, on indique les correspondances avec les types agro-écologiques (éventuellement les faciès) qui ont servi de base pour la zone étudiée,

- un niveau de valeur de Potentiel Théorique Fourrager de pâturage (PTF exprimé en UFL, Cozic, 1987), issu des valeurs moyennes de PTF des faciès agro-écologiques constitutifs du type physiognomique considéré.

Pour les Alpes du Nord françaises, ces caractéristiques des types physiognomiques sont indiquées dans les tableaux 1 et 2.

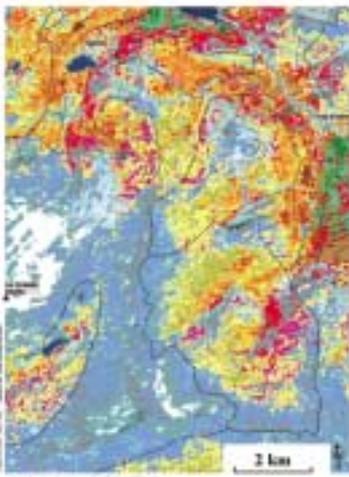
FIGURE 3 : Illustrations des cartes physiognomiques à l'échelle des Unités Pastorales (UP).

3. Organisation spatiale des végétations d'alpages dans les Alpes du Nord françaises

FIGURE 3 : Illustrations of the physiognomical maps at the scale of Pastoral Units.

On illustre ici deux contributions à la connaissance de la diversité spatiale des végétations pâturées d'altitude, sur la base des cartes physiognomiques réalisées, à deux échelles différentes.

Carte de base + contours UP



Haute Tarentaise

Carte de base + contours UP + fond de carte



Chablais



■ A l'échelle des unités pastorales

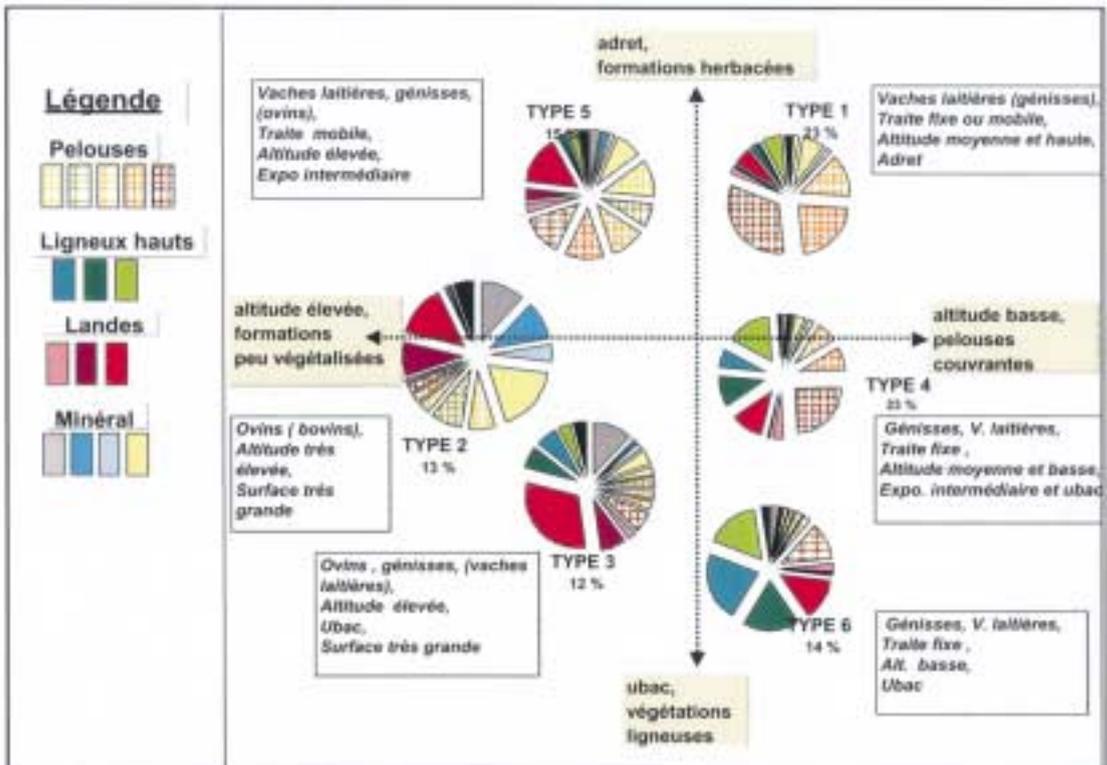
Les cartes des types physiologiques des végétations d'alpages sont un outil particulièrement utile au niveau des unités fonctionnelles que sont les unités pastorales, pour l'élaboration et la mise en œuvre des diagnostics pastoraux, des plans de gestion pastoraux, des actions agro-environnementales, ainsi que pour l'analyse de l'état et du fonctionnement des habitats pastoraux. Cette utilisation est facilitée par le caractère numérique de ces cartes qui permet leur analyse au travers de l'outil SIG (figure 3).

■ A l'échelle d'un massif : la cartographie des types physiologiques permet d'établir une typologie des alpages

Les évolutions des pratiques et de la végétation ont entraîné une répartition très contrastée des types de couverts végétaux d'un massif à l'autre (Chablais, Beaufortain...) et entre alpages au sein d'un même massif. Une étude récente du Cemagref a cherché à décrire la dimension spatiale de cette répartition et à la mettre en relation avec les pratiques pastorales, au niveau de l'ensemble des alpages des deux départements de Savoie (BORNARD *et al.*, 1999). C'est ainsi que 836 alpages ont été caractérisés par leur couvert végétal [Types physiologiques de

FIGURE 4 : En Savoie, répartition moyenne des types physiologiques de végétation par alpage au sein des 6 types d'alpages.

FIGURE 4 : In Savoie region, mean distribution of the physiognomical types of vegetation per grazing among the 6 types of highland grazings.



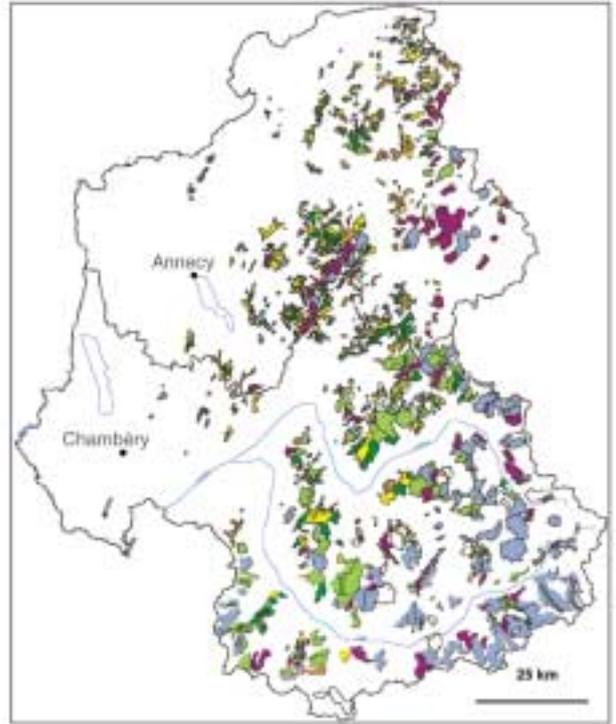
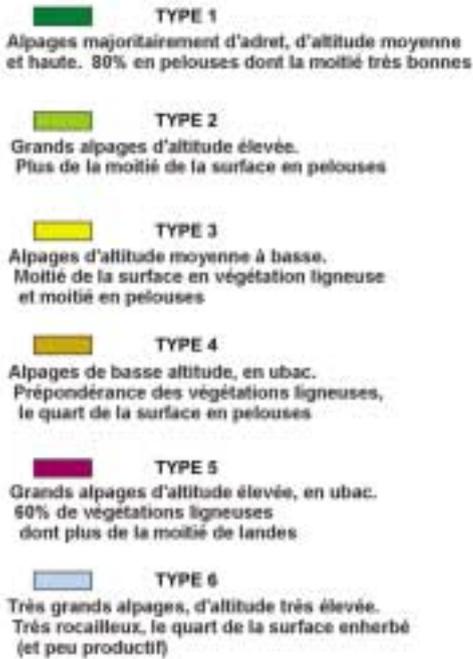


FIGURE 5 : Localisation des 836 alpages de Savoie, selon leur type.

FIGURE 5 : In Savoie region, localization of the 836 highland grazings, according to their type.

végétation], par des variables du milieu [Exposition, Altitude, Pouvoir tampon des sols] et par des caractéristiques de pratiques issues de l'enquête pastorale de 1996 [Superficie, Nature du cheptel, Charge animale]. Le traitement de ces données a été effectué par analyses factorielles.

Le résultat est la **caractérisation de six types dominants d'alpages**. La diversité de l'organisation spatiale de la végétation de chacun des six types d'alpages est illustrée figure 4. Le classement des 836 alpages selon les six types et leur localisation géographique apparaissent sur la carte de la figure 5. **Quatre types d'alpages sont largement dominés par une formation végétale spécifique :**

- **L'ensemble "pelouses" est largement dominant (78%)** uniquement **dans le type d'alpages n°1**, correspondant majoritairement à des alpages à vaches laitières. De plus, pour les alpages de ce type, le tiers de la surface est recouvert de pelouses de très forte production. Cela est lié à la fois au système de pratiques très élaborées caractérisant les alpages à vaches laitières, et à des conditions de milieu pas trop contraignantes.

- **Les formations ligneuses sont largement dominantes (74%) dans le type d'alpages n°6** où l'on rencontre les alpages les plus bas en altitude ; le quart de la surface restante est recouvert de pelouses assez productives, ce qui permet une exploitation par des bovins et parfois des vaches laitières. Dans ce type d'alpages, quasiment tous

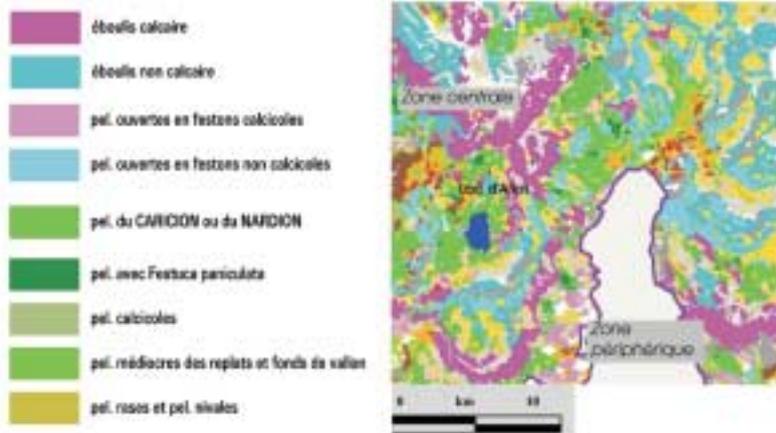


FIGURE 6 : Carte de localisation probable de 9 habitats pastoraux spécifiques dans le Parc national du Mercantour (extrait).

FIGURE 6 : *Map of the likely location of the 9 specific pastoral habitats in the Mercantour National Park (extract).*

situés en Haute-Savoie, compte tenu de leur faible altitude et de leur exposition en ubac, le risque de reboisement naturel ou d'embroussaillage par les ligneux est grand en cas de sous-exploitation pastorale ou en cas d'allègement important des pratiques. Cette situation est observée assez souvent sur les alpages exploités uniquement par des bovins non laitiers.

- **Les formations ligneuses basses sont prépondérantes (60%) dans le type n°3**, notamment les landes denses, en raison de l'altitude élevée combinée avec une exposition en ubac. En cas d'allègement des pratiques pastorales, là aussi les formations ligneuses actuelles peuvent s'étendre, certes moins rapidement que dans les alpages de basse altitude, mais les conséquences seraient importantes au point de vue pastoral compte tenu des faibles ressources pastorales de ce type d'alpages d'altitude élevée où les pelouses couvrantes sont peu étendues.

- **Les formations mixtes végétal/minéral sont dominantes (40%) dans le type d'alpages n°2** qui correspond aux alpages d'altitude très élevée. Les conditions physiques peu favorables à l'herbe sont aussi dénotées par la présence de 25% de rochers et d'éboulis et 15%

ENCADRÉ 1 : **Caractéristiques du type d'alpage n°1.**

INSERT 1 : **Characteristics of the upland grazing type Nr. 1.**

Milieu-pratique	Ce sont les alpages d'altitude moyenne et haute, de surface variable (un tiers dans chacune des classes : petit, moyen et grand), majoritairement d'adret. La moitié des alpages est exploitée par des vaches laitières et le tiers par des bovins sans lait, avec une charge animale d'un niveau moyen (0,8 UGB/ha pendant 100 j). Parmi les alpages à vaches laitières, le mode de traite se répartit également entre traite fixe et traite mobile.
Végétation	C'est le type où la végétation est la plus riche ; l'ensemble des pelouses représente près de 80% de la surface dont 40% sont des pelouses de très forte production. Cette qualité de la végétation est à relier en grande partie au système de pratiques pastorales élaborées propre aux alpages à vaches laitières, et à des conditions naturelles relativement favorables (exposition, altitude intermédiaire).
Région	Ces alpages se rencontrent majoritairement en Basse-Tarentaise, Pays de Thônes, Beaufortain et Basse-Maurienne.
Nombre d'alpages	191

de landes denses. De plus, dans la partie enherbée, ce sont les pelouses rases qui dominent.

Les types d'alpages n°4 et n°5 sont plus homogènes au niveau de la répartition des formations végétales. A titre d'exemple, les caractéristiques détaillées du type d'alpages n°1 sont indiquées dans l'encadré 1.

Localisation probable de formations pastorales spécifiques s'appuyant sur la télédétection et les SIG

1. Bases méthodologiques

Par construction, à chaque type physionomique décrit précédemment peuvent correspondre plusieurs types agro-écologiques. L'idée de base ici est de **chercher à se rapprocher de cette information agro-écologique**, en s'appuyant sur les cartes physionomiques et sur des données de milieux, de façon à localiser des formations pastorales particulières (faciès, groupement, habitat) dont l'aire d'extension correspond à des conditions écologiques bien spécifiques, pour lesquelles on dispose de données spatialisées dans un SIG (figure 2b). Cette démarche permet de décrire plus finement l'extension spatiale de certaines formations. Cette recherche s'insère dans les travaux de plus en plus nombreux tendant à mettre au point des méthodes de localisation probable d'espèces ou d'habitats d'espèces, animales ou végétales (FRANKLIN, 1995 ; GUISAN *et al.*, 1998 ; GUISAN et ZIMMERMANN, 2000 ; PFEFFER *et al.*, 2003). On part du principe que plus une formation est dépendante de conditions de milieux marquées (substrat, topographie...), plus il doit être possible d'en décrire l'aire d'extension. Ainsi, parmi la vingtaine de types agro-écologiques d'un massif, on a fait l'hypothèse qu'une dizaine pourraient être discriminés spatialement par cette méthode. Par ailleurs, une telle cartographie de certaines formations pastorales permet, par emboîtement, de réaliser un zonage des Alliances auxquelles elles appartiennent.

2. Application dans le Parc national du Mercantour

Les formations supraforestières pâturées du Mercantour sont situées au-dessus de 1 800 mètres d'altitude, c'est-à-dire dans l'étage alpin et le subalpin supérieur. **A ces altitudes, ce sont essentiellement les facteurs abiotiques qui prévalent et déterminent la nature du tapis végétal.** "L'impact sur la végétation attribué aux facteurs enneigement et température, qui résultent eux-mêmes de la conjonction de facteurs d'altitude, exposition et géomorphologie, conduit à classer la

végétation supraforestière en trois modes¹ : nival, thermique et intermédiaire” (JOUGLET, 1999). D'autres facteurs abiotiques interviennent dans la répartition de la végétation : la nature de la roche mère, le type de sol et le fonctionnement hydrique. Les facteurs liés aux pratiques de pâturage, essentiellement ovin dans cette région, ont globalement moins d'impact sur la répartition spatiale de la végétation que les facteurs abiotiques, mais peuvent cependant influencer sur l'état et l'évolution de la végétation selon la répartition des charges animales, le degré des prélèvements, les périodes d'utilisation, la localisation des trajets et des parcsages des animaux.

Parmi les nombreuses formations végétales naturelles et semi-naturelles du Mercantour (LAMBERTIN, 1999) on trouve 25 habitats d'intérêt communautaire concernant les milieux rocheux, les pelouses, les landes et les forêts. Le programme EON2000+ (Earth Observation for Natura 2000) se focalise sur les habitats ouverts en relation avec les pratiques pastorales. Il s'agit des pelouses, proprement dites, mais aussi de certains éboulis et de certaines landes. Dans le cadre de ce programme, le Cemagref avait comme objectif d'affiner la cartographie physionomique de la végétation pour aboutir à des niveaux de description plus précis en termes agro-écologique et phytosociologique, pour répondre à l'attente du gestionnaire de ce parc.

Neuf habitats pastoraux spécifiques ont été recherchés : pelouses médiocres des replats et fonds de vallée, pelouses rases et pelouses nivales, pelouses avec *Festuca paniculata*, pelouses calcicoles, pelouses du *Festucion* ou du *Nardion*, pelouses ouvertes en gradins calcicoles, pelouses ouvertes en gradins non calcicoles, éboulis calcaires, éboulis non calcaires. Les correspondances obtenues, pour

TABEAU 3 : Les quatre entrées majeures concernant les typologies des végétations d'alpages du Mercantour.

TABLE 3 : The four major entries concerning the typologies of the highland vegetations in Mercantour.

Entrée : Typologie des Alpes sud-occidentales (JOUGLET, 1999)	Entrée : Natura 2000	Entrée : Télédétection satellitale	Entrée : Parc national du Mercantour
Types agro-écologiques régionaux	Alliances phytosociologiques	Types physionomiques	Habitats pastoraux spécifiques
PN4	<i>Caricion ferruginae</i> (pour partie)	P3	1. Pelouses médiocres des replats et fonds de vallon
PN2 PN3	<i>Salicion herbaceae</i>	P2	2. Pelouses rases et pelouses nivales
PI6 PI7	<i>Festucion variaie</i>	P6	3. Pelouses avec <i>Festuca paniculata</i>
PT2 PI5	<i>Mesobromion</i>	P3 P4 P5	4. Pelouses calcicoles
PI1 PI2 PI4	<i>Festucion & Nardion</i>	P3 P4 P5	5. Pelouses du <i>Festucion</i> ou du <i>Nardion</i>
PT1 PT3 PT4	<i>Seslerion variaie</i>	P1 P2	6. Pelouses ouvertes en gradins calcicoles
PT1	<i>Festucion variaie</i>	P1 P2	6. Pelouses ouvertes en gradins non calcicoles
E1	<i>Thlaspion</i>	E1 E2	8. Eboulis calcaires
E1	<i>Androsacion</i>	E1 E2	9. Eboulis non calcaires

1 : Définition des différents modes (JOUGLET, 1999) :

- Le mode nival occupe principalement les fonds de vallon, les combes et les replats de l'étage alpin où la durée de l'enneigement est supérieure à 7 mois.
- Le mode thermique occupe les pentes fortes et les crêtes faiblement enneigées et déneigées très tôt du subalpin à l'alpin. Elles sont exposées à la rigueur des températures en hiver et aux fortes chaleurs estivales. Durée d'enneigement inférieure à 5 mois.
- Le mode intermédiaire occupe les pentes faibles et les replats situés dans l'alpin inférieur et surtout dans le subalpin. Durée d'enneigement de 5 à 7 mois.

Types physionomiques	⇒ Types agro-écologiques correspondants	⇒ Critères discriminants (sous SIG)	⇒ Habitats pastoraux spécifiques
1 ^{er} exemple : - Pelouses très fortement productives (en phytomasse), P6	- Pelouses à <i>Festuca paniculata</i> (PI6, PI7) - Prés de fauche - Mégaphorbiaies	Altitude > 1 800 m	3. Pelouses à <i>Festuca paniculata</i> (PI6, PI7)
2 ^e exemple : - Pelouses ouvertes, P1 - Pelouses rases, P2	- PT1, PT4, PT5 - PN3, PI1, PT5	Substrat : calcaire Altitude > 1 700 m Pente > 40%	6. Pelouses ouvertes en festons calcicoles (PT1.1, PT5.1)

TABLEAU 4 : Critères discriminants pour localiser certains habitats pastoraux spécifiques (2 exemples).

TABLE 4 : *Discriminating factors used for the localization of certain specific pastoral habitats (2 examples).*

une même formation, entre les quatre niveaux descriptifs sont présentées au tableau 3.

Les critères physionomiques et écologiques retenus pour la discrimination des neuf habitats pastoraux spécifiques sont : type physionomique, altitude, pente, exposition, substrat et radiation solaire. L'exemple des 'Pelouses à *Festuca paniculata*' et celui des 'Pelouses ouvertes calcicoles' sont illustrés dans le tableau 4. **L'application aux neuf formations a permis de générer la carte de leur localisation probable** dans une partie de la zone centrale du Parc (figure 6).

Conclusion

La cartographie physionomique des végétations d'alpages, s'appuyant sur des données satellitaires et de milieux *via* les SIG, et pilotée par des typologies agro-écologiques régionales, permet de développer une description de la diversité spatiale de ces milieux pâturés de montagne à plusieurs niveaux : quartier d'alpage, unité pastorale, massif. Cet emboîtement d'échelles apparaît de plus en plus nécessaire pour répondre à des enjeux multiples de connaissance et de gestion. Directement liée à la résolution spatiale des images satellitaires utilisées, l'échelle de validation du 1/25 000 est bien adaptée à la métrique générale des unités écologiques retenues : les types agro-écologiques. La méthode mise en œuvre permet d'articuler la description de ces végétations selon trois entrées majeures : types agro-écologiques, traits physionomiques, appartenance phytosociologique. Outre leurs utilisations directement pastorales (diagnostics pastoraux, plans de gestion pastoraux, inventaires), les cartes physionomiques produites permettent l'analyse spatiale de l'organisation des végétations pastorales de montagne par leur utilisation indirecte (SIG) ou directe : localisation probable d'habitats pastoraux spécifiques, typologies d'alpages en fonction de la diversité spatiale des végétations et des pratiques, par massif ou région. Plus généralement, cette approche est une contribution à la connaissance de l'écologie des paysages pastoraux de montagne et le niveau de description physionomique produit est un outil supplémentaire pour répondre à d'autres objectifs en matière de gestion de la biodiversité de ces milieux, par exemple le maintien de milieux ouverts ou la caractérisation des habitats de l'avifaune de montagne.

Travail présenté aux Journées d'information de l'A.F.P.F.
"La biodiversité des prairies. Un patrimoine - Un rôle fonctionnel",
les 23 et 24 mars 2004

Remerciements

Les auteurs expriment leurs vifs remerciements à M. LAMBERTIN, J. CLAUDIN, S. MOREL, J. FRAT, M. DESHAYES, P. COMMENVILLE pour leur collaboration à différentes phases de ce travail, lors des applications de terrain dans les Parcs de la Vanoise et du Mercantour. Ces travaux ont pu être conduits grâce au soutien de plusieurs programmes ou institutions : Ministère de l'Écologie (DNP), ATEN, GIS Alpes du Nord, Parcs nationaux de la Vanoise et du Mercantour, Projet européen EON2000+.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERNARD-BRUNET J. (2000) : "La télédétection satellitale au service de la gestion des pâturages d'altitude", *Le pastoralisme en France à l'aube des années 2000, Pastum hors série*, Association française de pastoralisme, Ed. de la Cardère, 223-229.
- BERNARD-BRUNET J., CLAUDIN J. (2004a) : "Pastoral Habitats in Alpine Landscape", *Portfolio of Earth Observation Based Indicators for Biodiversity and Nature Protection*, Estreguil C. & Cerruti M., ed., European Project EON2000+, JRC, Ispra, Italie, 15-17.
- BERNARD-BRUNET J., CLAUDIN J. (2004b) : "Pastoral Habitats in Alpine Landscape", <http://www.eon2000plus.org/index.html>
- BERNARD-BRUNET J., BORNARD A., JOUGLET J.P., FAVIER G. (1999) : *Le domaine supraforestier du Parc national de la Vanoise. Typologie et cartographie physionomiques des végétations d'altitude, par télédétection*, Parc National de la Vanoise, Cemagref UR AMM, Grenoble, 49 p.
- BERNARD-BRUNET J., FAVIER G., BERNARD-BRUNET C. (2003) : *Cartographie physiologique des végétations du domaine pastoral d'altitude du Parc national des Pyrénées par télédétection satellitale*, Rapport final. Cemagref UR AMM, Parc national des Pyrénées, 50 p.
- BORNARD A., DUBOST M. (1992) : "Diagnostic agro-écologique de la végétation des alpages laitiers des Alpes du Nord humides : établissement et utilisation d'une typologie simplifiée", *Agronomie*, 12-8, 581-599.
- BORNARD A., BASSIGNANA M. (2001) : *Typologie agro-écologique des végétations d'alpages en zone intra-alpine des Alpes Nord-occidentales*, Projet Interreg France-Italie N° 110, Cemagref Grenoble, IAR Aoste, 134 p.
- BORNARD A., BERNARD-BRUNET J., COZIC P., BERNARD-BRUNET C., FAVIER G. (1999) : *Bilan sur les diversités spécifiques et écologiques des végétations des alpages des Alpes du Nord. - Bilan sur leur diversité spatiale en fonction des milieux et des pratiques*, Rapport DNP, Cemagref UR AMM, Grenoble, 73 p.
- BORNARD A., BERNARD-BRUNET J., BERNARD-BRUNET C., FAVIER G. (2001) : *La végétation des alpages des Alpes du Nord. Guide pour l'utilisation de la cartographie des types physiologiques de la végétation d'altitude*, Document technique, Cemagref UR AMM, Gis Alpes du Nord, 44 p.
- BRAU-NOGUÉ C. (2003) : *Cartographie des grands types de végétation du domaine pastoral pyrénéen (Partie centrale et occidentale). Présentation détaillée du modèle agro-écologique de référence. Correspondances entre les différentes nomenclatures*, Rapport final, Brau Nogué / Parc national des Pyrénées, 33 p.

- CHERPEAU A. (1996) : *Télédétection et Agro-écologie, un essai de cartographie destinée à la gestion des milieux herbacés de haute montagne. Application au Parc National des Ecrins*, thèse de doctorat, Université J. Fourier, Grenoble, 230 p.
- Corine Biotope Manual (1991) : *Habitats of European Community, part2*, Office for official Public of the EC, Luxembourg, 300 p.
- COZIC P. (1987) : "Une méthode de diagnostic pastoral : de la composition de la végétation à la charge animale à préconiser", *Exploitation de pelouses et landes subalpines par des bovins et des ovins*, Cemagref INERM, Grenoble, 211, 173-197.
- COZIC P., BERNARD-BRUNET C. (1991) : "Typologie de la végétation des estives pyrénéennes d'altitude : un outil de gestion pastorale", *IV^e Cong. Int. des Terres de Parcours*, Montpellier, avril 1991, 1 p. + poster.
- DAGET P., POISSONET J. (1969) : *Analyse Phytologique des prairies. Applications agronomiques*, Éd. Cnrs-Cepe Montpellier, doc 48, 67 p.
- DIRECTIVE 92/43/CEE DU CONSEIL du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages + Annexes, <http://europa.eu.int/comm/environment/nature/>
- FRANKLIN J. (1995) : "Predictive vegetation mapping : geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients", *Progress in Physical Geography*, 19, 4, 474-499.
- FRAT J. (2002) : *L'apport de l'observation de la terre et des SIG pour la gestion des milieux pastoraux d'intérêt communautaire. Le cas du site Natura2000 'le Mercantour'*, mémoire DESS, Université de Toulouse (F), 90 p.
- GUISAN A., ZIMMERMANN N.E. (2000) : "Predictive habitat distribution models in Ecology", *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- GUISAN A., THEURILLAT J.P., KIENAST F. (1998) : "Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment", *J. Vegetation Sci.*, 9, 65-74.
- JOUGLET J.P. (1999) : *Les végétations des alpages des Alpes françaises du Sud. Guide technique pour la reconnaissance et la gestion des milieux pâturés d'altitude*, ATEN, Cemagref Éditions, 205 p.
- JOUGLET J.P., COZIC P. (1997) : "Typologies et cartographies phyto-écologiques adaptées à la gestion des unités pastorales d'altitudes", *La cartographie pour la gestion des espaces naturels*, Actes des Rencontres Internationales, Saint-Étienne 13-17 novembre 1995 : *Colloque Typologies pour la gestion des milieux naturels et cartographies*, Aten, Crenam, Cemagref Éditions, 109-118.
- LAMBERTIN M. (1999) : *Groupement végétaux d'altitude dans le Parc National du Mercantour. Phanérogames et cryptogames vasculaires des étages subalpins et alpins (correspondance avec les Directives Natura 2000 et Corine 1989)*, Parc national du Mercantour, Nice, 175 p.
- MOREL S. (2001) : *Aide à la cartographie des formations supraforestières. Couplage système d'information géographique et bases de connaissances. Application à un secteur du Parc national de la Vanoise*, mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine, UJF, Grenoble, Parc national de la Vanoise, Cemagref-AMM, 43 p.
- Natura 2000 (1999) : *Manuel d'interprétation des Habitats de l'Union Européenne*, EUR 15/2. Commission européenne, DG de l'environnement, 132 p.
- PFEFFER K., PEBESMA E.J., BURROUGH P.A. (2003) : "Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes", *Landscape Ecology*, 18, 759-776.

SUMMARY

Cartography of highland grazings by teledetection : a tool for the description of their spatial diversity

The knowledge of the biodiversity of highland grazings, be they grasslands, heaths or rocks, is of greatest importance for pastoral management, given the context of sustainable development and of multiple utilization. These types of vegetation are spatially very heterogeneous, owing to natural conditions and to human practices. Characterizing this heterogeneity contributes to a better analysis of the possible use of this resource for grazing and to an improved knowledge of the biodiversity of these environments. A team of research workers, the 'Ecologie pastorale montagnarde' belonging to the Cemagref in Grenoble, established agro-ecological models comprising some twenty different types to cover the great geographical entities of the French highlands. In order to achieve a spatial inventory of mountain grazings covering hundred of thousands of hectares, a methodology of identification and of medium-scale cartography was set up for the great types of vegetation ; it is based on an approach mixing farm ecology and teledetection. This work was carried out on the territory of four National Parks, belonging to four French highland regions, and resulted in the identification and the spatialization of physiognomical types in these vegetations. The results will be used for a second series of studies, aimed at a more precise discrimination of how certain specific pastoral formations are localized, by crossing them with data on the environmental characteristics using the SIG systems ('geographical information systems').