

Pole Départementale de Recherches sur la Biodiversité en ISERE

Rapport Final Projet CHAMOIS

Cartographie Haute résolution des Milieux Ouverts d'altitude : pelouses, prairies, landes de l'Isère

Responsables : Philippe Choler (CNRS, LECA), Sandra Luque (Irstea, Grenoble)

Chargées de mission : Vincent Thierion (IRSTEA), Alexis Mikolajczak (CBNA), Marc Isenmann (CBNA), Thomas Sanz (CBNA), Julien Renaud (LECA), Julia Roig (IRSTEA), Denis Marechal (IRSTEA)



Merci de *Citer le rapport* : Thierion, V.; Mikolajczak, A.; Isenmann, M.; Sanz, T. ; Renaud, J. ; Roig J. ; S. Luque ; Choler, P. (2014) *Cartographie Haute résolution des Milieux Ouverts d'altitude : pelouses, prairies, landes de l'Isère*. Isère Conseil General, Rapport final 36 pp. Grenoble, France

Sommaire

1. Liste des personnes et partenaires ayant contribué au projet CHAMOIS	4
2. Résumé.....	5
3. Rappel sur les enjeux et objectifs du projet	6
4. Le contexte de réalisation du projet	7
5. Méthodologie.....	8
5.1. Définition de l'emprise de l'étude	8
5.2. Télédétection	10
5.3. Synthèse et analyse des relevés de végétation.....	13
6 . Résultats.....	17
6.1. Typologie physionomique	17
6.2. Distribution spatiale des types physionomiques	20
6.3. Diversité floristique	22
6.4. Mise en correspondance des typologies	24
7. Conclusion et perspectives	26
7.1. L'établissement d'une meilleure correspondance entre types physionomiques et habitats.	26
7.2. L'utilisation d'autres couches d'information pour comprendre puis modéliser la distribution spatiale des végétations d'altitude	26
7.3. Le développement de modèles de distribution spatiale	27
6. Valorisation et mise à disposition des résultats.....	28
7. Bibliographie	29
8. Annexes.....	31

1. Liste des personnes et partenaires ayant contribué au projet CHAMOIS

Philippe CHOLER et Julien RENAUD
Laboratoire d'Ecologie Alpine (LECA)
UMR 5553 UJF-CNRS

Sandra LUQUE, Vincent THIERION, Denis MARECHAL et Vincent BRETON
Unité de Recherche Ecosystèmes Montagnards
Irstea - Centre de Grenoble

Alexis MIKOLAJCZAK, Thomas SANZ et Marc ISENMANN
Conservatoire Botanique National Alpin
Antenne de Chambéry

Julia ROIG stagiaire du Master 2 «Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement» de mars à septembre 2014, co-encadrée par Irstea et le LECA et dont le mémoire d'étude (Roig 2014) a été utilisé pour l'écriture du présent rapport.

2. Résumé

Le projet CHAMOIS avait pour principal objectif de cartographier les milieux ouverts d'altitude (pelouses, prairies et landes) de l'Isère à une résolution métrique. Il s'agit **d'un défi technique et scientifique** car une telle entreprise n'a jamais été conduite sur des territoires de montagne aussi vastes. Pour mener à bien cette recherche, le projet CHAMOIS a bénéficié de l'appui de deux programmes nationaux : (i) le programme CARHAB visant à une cartographie des végétations naturelles et semi-naturelles de France et (ii) le programme DivGrass visant à une synthèse floristique et écologique des prairies permanentes, pelouses et parcours de France. Conjointement à ces deux initiatives, un important effort méthodologique a été mené afin d'analyser puis de croiser deux types d'information : (i) des images satellite récentes et de haute résolution spatiale couvrant la haute montagne iséroire, (ii) une importante base de données de végétation contenant plus de 7000 relevés floristiques.

L'analyse des images satellite a été réalisée par des méthodes de segmentation et de classification expertisée et supervisée. Des typologies physionomiques ont été produites pour les six grands secteurs de montagne de l'Isère: Belledonne, Chartreuse, Vercors, Trièves, Ecrins Est et Ecrins Ouest. Les résultats issus de ces traitements d'image ont été validés par des observations au sol et des documents cartographiques existants sur des zones test situées en Belledonne, Ecrins et Vercors. L'ensemble de l'analyse conduit à **une évaluation précise de la surface et de la répartition spatiale des grandes formations végétales constitutifs des espaces agropastoraux de la montagne iséroise**. L'espace agropastoral moyennement et fortement productif occupe environ 50 000 hectares en Isère.

Un deuxième axe de travail a visé à mettre en correspondance les types physionomiques et la diversité floristique des milieux ouverts d'altitude. Ce travail a concerné les massifs cristallins externes (Belledonne et Ecrins). Une analyse des relevés de végétation a été conduite en utilisant des méthodes innovantes relevant de la théorie des graphes. L'analyse des graphes de co-occurrence des espèces a permis d'identifier des 'modules' ou groupes d'espèces partageant des exigences écologiques semblables et traduisant les grands types d'habitats. Une première tentative de mise en correspondance des "ambiances floristiques" définies par les modules et des types physionomiques a été réalisée. Ce travail pionnier ouvre la voie à **une cartographie semi-automatisée des habitats ouverts d'altitude**.

En conclusion, le projet CHAMOIS a contribué **au développement de méthodes de cartographie des habitats adaptées aux milieux d'altitude** qui par nature sont très hétérogènes. L'application de ces méthodologies à l'échelle des Alpes françaises constitue un des prolongements envisagés de cette étude. Ce projet a catalysé des interactions entre des expertises très diverses - télédétection, botanique et géobotanique, analyse de données - et a montré la valeur ajoutée de cette multidisciplinarité. Enfin, un aboutissement de ce projet est la mise à disposition **d'une base de données environnementale de haute résolution spatiale** couvrant l'ensemble des milieux isérois d'altitude; une base de données représentant tout à la fois un outil de connaissance du patrimoine naturel du département et d'aide à la décision pour les gestionnaires du territoire.

3. Rappel sur les enjeux et objectifs du projet

Le projet CHAMOIS est un projet portant sur les végétations naturelles et semi-naturelles de l'Isère situées au-dessus de la limite supérieure des forêts d'altitude. Les milieux concernés par cette étude sont principalement des landes, prairies, pelouses et des milieux plus ouverts de haute altitude (éboulis végétalisés). Le domaine agropastoral d'altitude, communément appelé 'alpages', est entièrement inclu dans cet ensemble. Ces milieux se rencontrent dans une large gamme de conditions topographiques et climatiques. Ils regroupent beaucoup d'espaces naturels de forte valeur patrimoniale pour lesquels les enjeux de gestion conservatoire sont très forts (milieux tourbeux de montagne, pelouses sèches, parcours etc). Dans les conditions climatiques les plus favorables, il peut s'agir d'espaces présentant des dynamiques naturelles rapides, en réponse aux changements d'utilisation des terres (déprise agricole ou intensification) et aux changements climatiques. A ce titre, beaucoup de ces milieux peuvent être considérés comme des **écosystèmes sentinelle**, au sens où leur structure, leur fonctionnement et leur dynamique répondent fortement aux changements dans les forçages climatiques et anthropiques.

Dans ce contexte, le projet CHAMOIS avait pour enjeu de réaliser (i) une synthèse sur la **distribution spatiale de ces milieux** par le traitement d'images satellite de haute résolution et (ii) une synthèse sur la **diversité floristique** de ces milieux ouverts d'altitude par l'analyse des bases de données de relevés de végétation disponibles. Les trois principaux défis du projet CHAMOIS ont été (i) de synthétiser et d'harmoniser les données disponibles, (ii) de mettre en oeuvre des analyses innovantes pour surmonter les difficultés liées à l'analyse de volumineux jeux de données, et enfin (iii) de mettre en correspondance deux cadres typologiques : celui issu de l'analyse d'image définissant des types physionomiques et celui issu de l'analyse écologique définissant des ambiances floristiques pouvant être mis en correspondance avec des habitats et/ou des alliances phytosociologiques. L'objectif final est la mise en place d'une méthodologie permettant d'analyser puis de croiser ces deux types d'information puis son utilisation opérationnelle à l'échelle de la montagne iséroise afin de produire une cartographie semi-automatisée des milieux ouverts d'altitude. La figure 1 résume ces principales lignes de force du projet CHAMOIS.

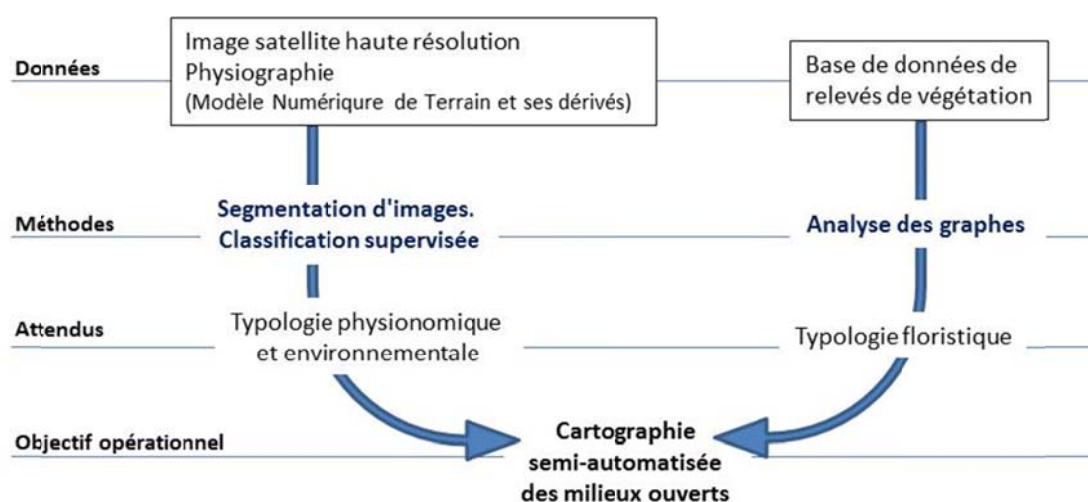


Figure 1: Synopsis du projet CHAMOIS

4. Le contexte de réalisation du projet

La mise en œuvre du projet CHAMOIS a bénéficié d'une conjoncture favorable. Il convient ici de mentionner:

(i) la dynamique créée autour du **programme national CarHAB** porté par le MEDDTL et qui vise à cartographier, d'ici l'horizon 2025, l'ensemble des végétations naturelles et semi-naturelles du territoire français à l'échelle du 1/25000^{ème}. L'objectif, à terme, est de pouvoir, une fois les cartographies validées, fournir une couche d'information pertinente pour les gestionnaires des territoires afin d'aider à la décision pour des mesures de gestion, de conservation, de valorisation. L'Isère est un des départements pilote pour la réalisation de cette cartographie. L'Unité Ecosystèmes Montagnards à Irstea Grenoble et le Conservatoire Botanique National Alpin ont été choisis par le MEDDTL comme les partenaires en charge de la cartographie des milieux ouverts de montagne dans le cadre de ce projet. Le travail réalisé dans CHAMOIS a ainsi pu bénéficier des données, des résultats et de l'appui scientifique et opérationnel de personnels en contrat sur le projet CarHAB et en premier lieu de Vincent Thiérion pour ses travaux sur la télédétection et les techniques de segmentation (Thierion and Breton 2012), de Denis Maréchal et de Mathilde Redon pour les premières tentatives sur la modélisation des habitats de montagne (Redon et al. 2012, Samuel et al. 2013, Maréchal et al. 2014). Les campagnes de terrain et l'analyse de la flore et des milieux de montagne ont été coordonnées par le CBNA dans la continuité des travaux menés par CarHAB sur la zone test de Belledonne.

(ii) les initiatives récentes visant à collecter puis analyser de volumineux jeux de données constitués par des milliers de relevés de végétation avec une emphase toute particulière sur les groupements herbacés. Ainsi, dans le cadre **du projet DivGrass** financé par la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB) et coordonné par le LECA, une synthèse sur la diversité floristique des prairies permanentes, pelouses et parcours de France a été menée à travers un partenariat entre laboratoires et conservatoires botaniques nationaux. Des méthodes écoinformatiques et d'analyse de données ont été développées pour organiser, traiter et valoriser l'information existante. C'est dans ce cadre que l'analyse des tableaux espèces-sites par la théorie des graphes s'est progressivement imposée comme une méthode efficace pour produire des typologies floristiques. Le projet CHAMOIS a mis en œuvre ces techniques pour réaliser une synthèse sur la végétation d'altitude des massifs cristallins externes (Belledonne - Ecrins et Grandes Rousses).

5. Méthodologie

5.1. Définition de l'emprise de l'étude

Le domaine d'étude inclut les territoires non forestiers de l'Isère qui sont situés au-dessus de 1000 m d'altitude. L'emprise spatiale correspondante a été délimitée en utilisant:

- le Modèle Numérique de Terrain (MNT) à 25 m de résolution spatiale (BD ALTI® IGN), et ses dérivés (pentes, orientation, courbures, etc.).
- la couche « SURFACE_EAU » au format vecteur qui correspond à toutes les surfaces en eau de plus de 20 m (BD TOPO® IGN).
- la BD Forêt® IGN version 2 qui permet d'isoler, au préalable, les forêts fermées (taux de recouvrement des arbres supérieur ou égal à 40 % sur une surface supérieure ou égale à 50 ares et sur une largeur supérieure ou égale à 20 mètres).

Le domaine d'étude ainsi défini peut être subdivisé en six secteurs principaux (Fig. 2 et 3): Chartreuse, Vercors, Trièves, Belledonne-Grandes Rousses, Ecrins (parties Est et Ouest). Par commodité, nous avons inclus dans le secteur Vercors la partie montagneuse du sud du département qui comprend une partie des montagnes du Dévoluy.

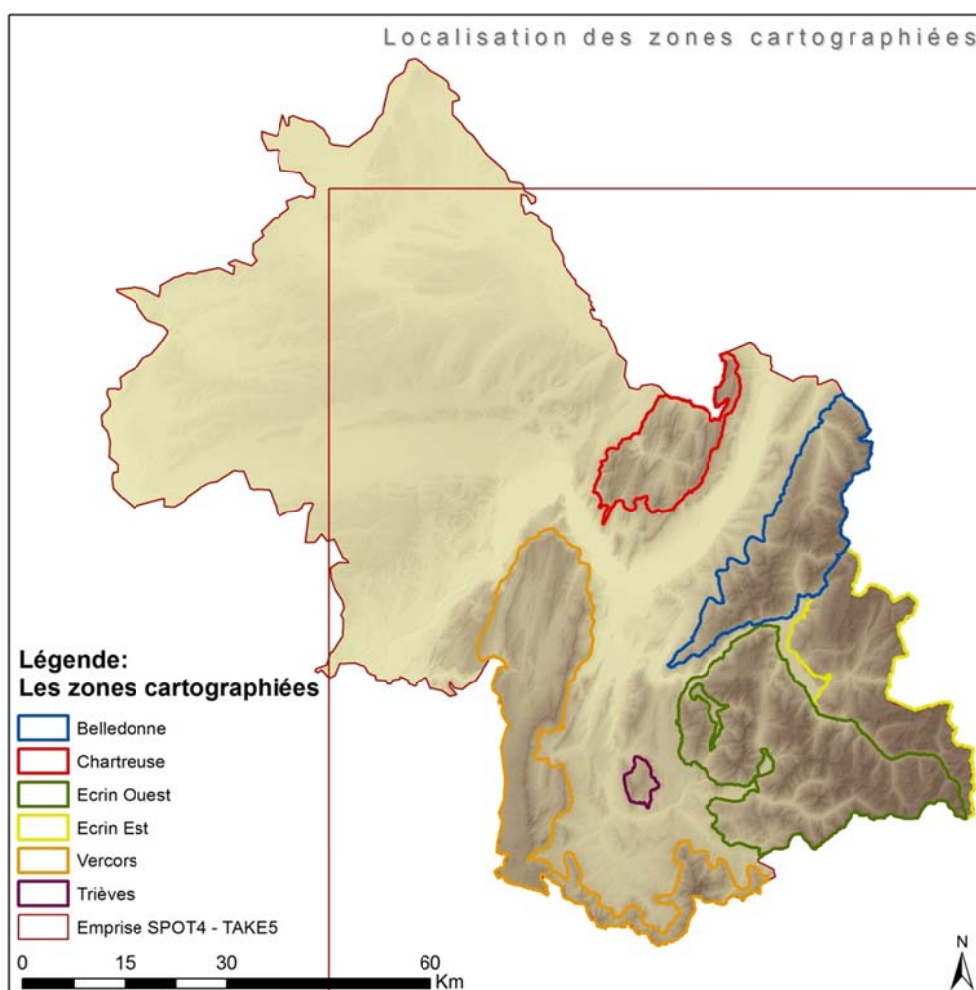


Figure 2. Localisation six secteurs d'étude du projet CHAMOIS.

L'emprise du projet SPOT4-Take5 décrit dans la partie Conclusions et Perspectives est également indiquée.

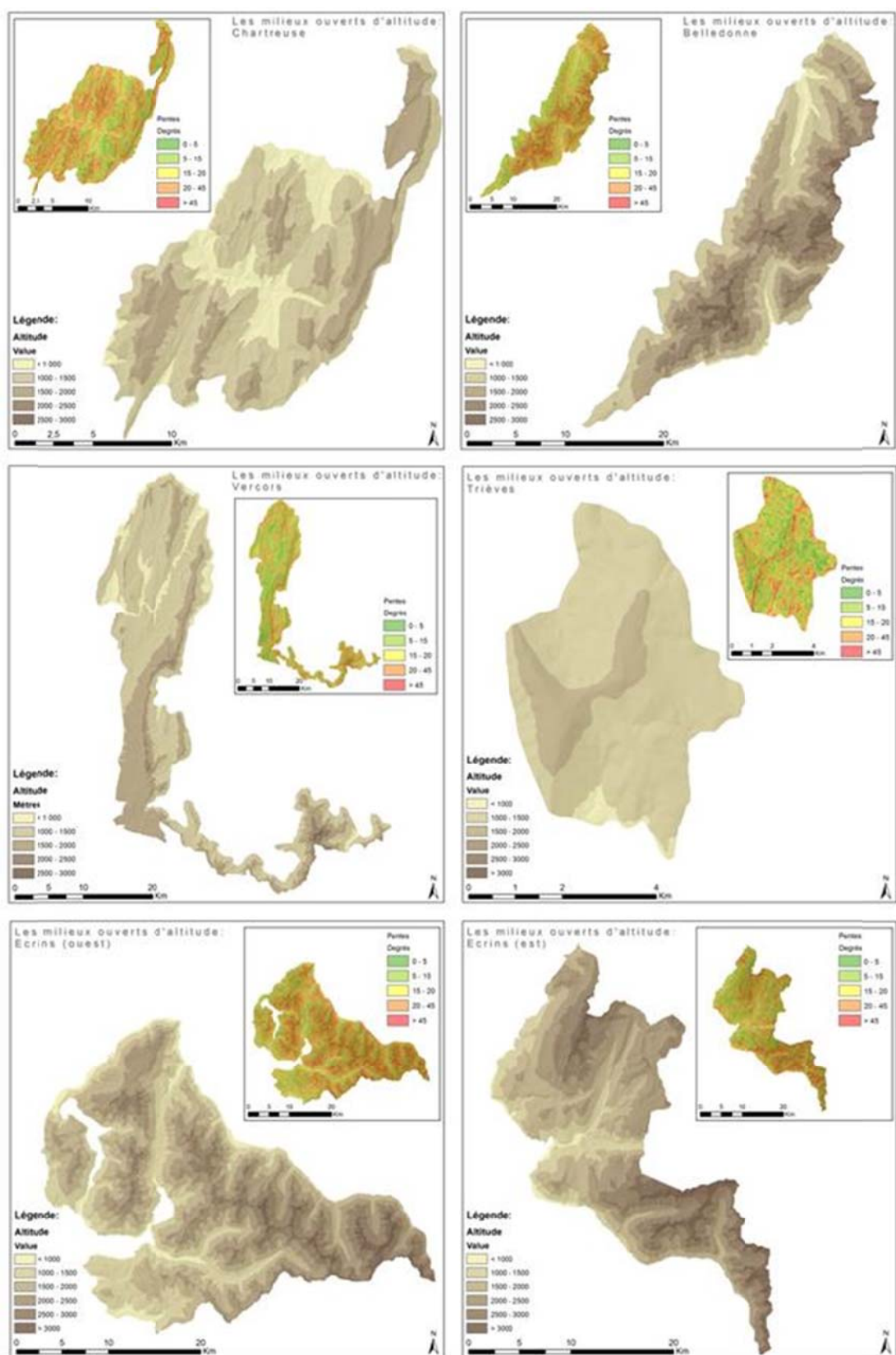


Figure 3. Contexte physiographique (altitude et pente) des six secteurs d'étude du projet CHAMOIS.

5.2. Télédétection

Contexte

L'analyse des images relève de la télédétection définie comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec eux » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988). L'utilisation de l'imagerie satellitaire pour la cartographie de la végétation représente un développement méthodologique majeur de ces dernières années. Plusieurs études ont montré que la télédétection constitue un outil puissant pour cartographier la physionomie de la végétation sur de vastes étendues géographiques (Franklin et Wulder, 2002 ; Lowry et al. 2007 ; Lucas et al., 2007 ; 2010 ; McDermid et al., 2005 ; Saadat et al., 2011 ; Turner et al., 2003 ; Wang et al. 2009 ; Wulder et al., 2004 ; Xie et al., 2008). Dans le milieu de la conservation et de la gestion du patrimoine naturel, ces méthodes se développent également en complément des approches plus traditionnelles de cartographie de la végétation. La disponibilité croissante d'images satellite de haute résolution couvrant de larges territoires et disponibles gratuitement sur le portail du projet GEOSUD (<http://www.geosud.teledetection.fr/>) est un élément décisif dans l'essor de ces techniques. Le défi méthodologique commun à tous ces travaux est de mieux saisir la relation entre un état physionomique défini à partir d'une analyse spectrale et morphologique et un habitat défini par un assemblage floristique particulier et des conditions stationnelles particulières.

Imagerie satellite SPOT 6

L'utilisation d'images satellitaires pour la cartographie de la physionomie végétale est conditionnée par les caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles des capteurs. La physionomie végétale est caractérisée par le recouvrement horizontal, la biomasse chlorophyllienne, le stade phénologie et la morphologie ou structure. À l'heure actuelle, de nombreux satellites optiques produisent des images exploitables pour évaluer ces différents paramètres. Si les capteurs à très grande résolution spatiale, tel que Pléiades, permettent de discriminer la présence d'espèces, la fauchée du satellite ne permet pas de couvrir des territoires tels que des massifs montagnards, des parcs naturels régionaux ou des parcs nationaux, avec des conditions de prise de vue homogènes. A l'inverse, un satellite comme MODIS a la capacité de couvrir de grandes étendues mais sa résolution spatiale de plusieurs centaines de mètres ne permet pas de bien discriminer les types physionomiques présents dans les paysages de montagne très hétérogènes. Pour le projet CHAMOIS, le choix s'est porté sur **l'analyse d'images SPOT 6** dont la fauchée est de 60 km mais dont les capacités d'acquisition peuvent permettre de couvrir une zone de 120 x 120 km en une seule passe. Les caractéristiques de l'image utilisée sont détaillées dans le tableau 1. L'intérêt de ce capteur réside dans sa double résolution spatiale: 1.5 m pour la bande panchromatique et 6 m pour les bandes multi-spectrales. À la vue du tableau 2, la bande panchromatique apporte une plus-value pour la détection de la structure de la végétation. Elle permet a priori de limiter les confusions radiométriques entre des faciès dont la quantité de biomasse est proche mais dont la rugosité est différente (ex : forêt de feuillus et pelouse à forte biomasse).

Altitude	Orbite	Bandes	Résolution spatiale	Résolution spectrale
694 km	Héliosynchrone	Bleue	6 m	0,450 – 0,520 μm
		Verte	6 m	0,530 – 0,590 μm
		Rouge	6 m	0,625 – 0,695 μm
		Proche Infrarouge	6 m	0,760 – 0,890 μm
		Panchromatique	1,5 m	0,450 – 0,745 μm

Tableau 1 : Caractéristiques du satellite SPOT 6 (Source : Airbus, Defence & Space, 2013)

Segmentation et Classification semi-automatique "orientée-objet"

Historiquement, les méthodes de classification d'images satellitaires pour la cartographie de végétation se sont principalement appuyées sur l'approche « pixel » (Congalton 1991). Chaque pixel de l'image est classifié suivant un échantillon de pixels d'apprentissage définissant les signatures spectrales de chaque type de végétation à classer. Lorsque l'on peut s'appuyer sur une bonne connaissance du territoire à cartographier (à partir d'échantillons « terrain » bien décrits) l'algorithme de classification par maximum de vraisemblance est généralement bien adapté. Cette approche est particulièrement intéressante dans le cas de milieux naturels fortement mosaïqués, étant donné que chaque pixel est classifié indépendamment suivant l'ensemble d'apprentissage. Or, les territoires de montagne sont très souvent caractérisés par une forte mosaïque paysagère, où les types de végétation ont souvent une surface souvent inférieure à quelques dizaines de mètres carrés.

Lors du processus de classification, la primitive sémantique de base peut aussi être assimilée à un objet, c'est-à-dire à un groupe de pixels. On parle d'approche « orientée-objet » dont l'intérêt pour la cartographie de la végétation a été démontré par plusieurs auteurs dans les dernières années (Baatz and Schäpe 2000, Benz et al. 2004). En effet, l'augmentation des résolutions spatiales ajoute une importante variabilité spectrale, rendant d'autant plus difficile la définition spectrale d'un type et augmentant par la même l'effet « poivre et sel » de la classification « orientée-pixel ». En complément, cette approche offre la possibilité de développer une approche hiérarchique multi-échelles du paysage. Le territoire d'étude peut donc être décomposé en plusieurs niveaux d'appréhension, de l'élément le plus petit, à savoir le pixel, jusqu'à des groupes d'objets de pixels. Cette approche innovante permet ainsi de développer des règles de connaissance, qui ne sont plus uniquement de nature spectrale, mais qui sont aussi dépendantes de l'agencement spatial, de la géométrie ainsi que des relations sémantiques et spatiales entre les objets (Fig. 4).

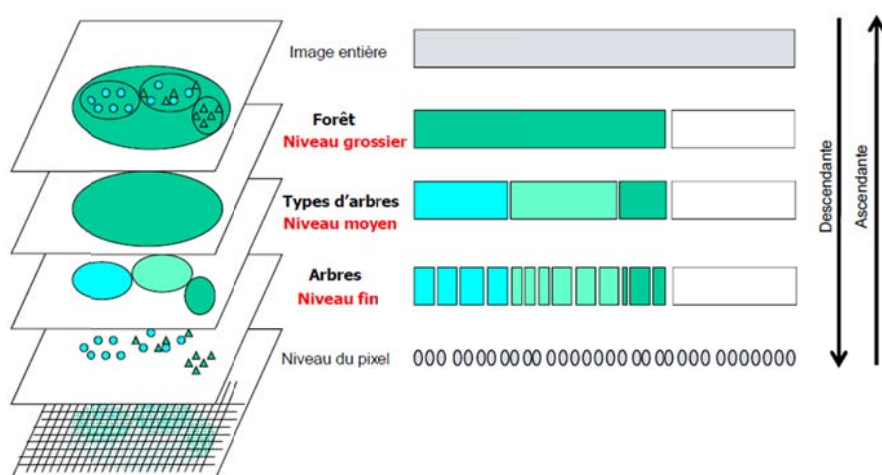


Figure 4 : Approche hiérarchique multi-échelle de l'approche "orientée-objet"

La classification « orientée-objet » repose sur une étape préalable de segmentation de l'image en entités homogènes et cohérentes avec la réalité spectrale de cette image et/ou des informations issues de la réalité du terrain. L'image peut être segmentée à différents niveaux hiérarchiques avec un emboîtement géométrique et sémantique de ces différents niveaux. Elle permet d'appréhender l'image/le paysage suivant différents niveaux géographiques. Dans le cadre de cette étude, le choix du logiciel de classification s'est porté sur le logiciel commercial eCognition Developer® développé par Trimble. L'algorithme de segmentation implémenté est basé sur la méthode de croissance de régions. L'algorithme sélectionne un ensemble de pixels dans l'image et analyse leurs pixels voisins, en fonction d'un critère d'homogénéité (généralement spectral, éventuellement textural ou écologique). S'ils répondent à ce critère d'homogénéité (seuil) l'algorithme les agrège au pixel « germe » de manière à former un objet (groupe de pixels). L'algorithme s'arrête lorsque l'ensemble des pixels de l'image sont regroupés en objets homogènes. Du point de vue logiciel, l'utilisateur fait varier deux paramètres principaux (Fig. 5) qui sont le facteur d'échelle (hétérogénéité maximale), et un critère de forme, permettant de contraindre l'homogénéité de l'algorithme de segmentation soit sur un critère de forme ou soit de couleur.

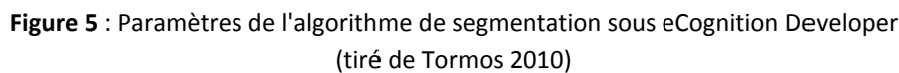
En complément, si l'utilisateur privilégie un critère de forme pour la génération des objets, il peut indiquer à l'algorithme, s'il souhaite que les objets répondent à une forme compacte (« compactness ») ou à une forme plus sinusoïdale (« smoothness »). Le choix d'un critère de couleur seul, en opposition à un critère de forme, ne permet pas de définir un critère de compacité.

L'intérêt du logiciel eCognition® réside dans sa capacité à effectuer une segmentation multi-résolution, c'est-à-dire la possibilité de segmenter une image à plusieurs niveaux d'échelle spatiale (taille d'objets) mais topologiquement liées. Son autre intérêt est de pouvoir intégrer, dans les processus de segmentation et de classification, des données hétérogènes (différents capteurs, données environnementales, etc.). La méthode implémentée dans CHAMOIS s'appuie sur la segmentation de l'image à deux niveaux hiérarchiques :

- une segmentation multi-résolution de l'image SPOT 6 qui a permis de délimiter des objets homogènes. Ce niveau permet d'établir l'ensemble des zones d'apprentissage de chaque type à classifier
- une segmentation « Chessboard » qui découpe l'image en objets carrés de taille identique correspondant à un nombre défini de pixels. Dans le cas de cette étude, un objet correspond à un pixel, l'approche peut donc être assimilée à une classification « pixel ». L'intérêt de cette approche réside dans le fait que les milieux d'altitude sont caractérisés par une forte variabilité spatiale des habitats.

Une fois ces deux niveaux créés, le télédécteur définit les zones d'apprentissage de chaque type grâce au premier niveau de segmentation. Il effectue ensuite une classification par maximum de vraisemblance sur les objets de la segmentation « Chessboard ».

Dans les secteurs déjà cartographiés par le CBNA ou le parc national des Ecrins (voir ci-dessous), les cartographies existantes sont traduites en termes de recouvrement horizontal de chaque type physiologique élémentaire. Cette donnée (raster de densité de chaque type physiologique) est intégrée dans eCognition et permet d'améliorer la localisation de types dont la détection par analyse spectrale est limitée, par exemple les landes basses.



13

dimension des tableaux augmente fortement. Typiquement, les tableaux que nous avons analysés sont de dimension $10^4 \times 10^3$. Des algorithmes heuristiques empruntés à la théorie des graphes ont été développés pour révéler de manière plus efficace et plus rapide la structure de ces tableaux. De telles méthodes sont utilisées aujourd'hui en bioinformatique pour l'analyse des séquences d'ADN. Ces méthodologies innovantes relevant de l'**écoinformatique** ont été déployées pour construire une typologie floristique des milieux ouverts d'altitude.

L'objectif est de définir des ensembles composés d'espèces aux exigences écologiques semblables. Associés à des paramètres stationnels, ces assemblages d'espèces constituent un critère clé dans la définition des habitats. Ce travail a été réalisé sur un extrait de la base de données du CBNA et comprenant plus de 7000 relevés de végétation représentatifs de la végétation des milieux ouverts d'altitude des massifs cristallins externes (Ecrins et Belledonne-Grandes Rousses). Chaque relevé, en présence/absence ou en recouvrement (abondance) est géoréférencé. Il correspond à une surface homogène du point de vue de la végétation avec une taille comprise entre 25 et 100 m².

Analyse du réseau espèce

Le choix s'est porté sur la réalisation **de réseaux d'espèces** dans lesquels les nœuds (espèce) sont liés par des arêtes en fonction d'une métrique de co-occurrence (Fig. 6). La métrique que nous avons utilisée pour déterminer si une arête doit être placée entre deux espèces est le paramètre U (Bruehlheide and Flintrop 1994). Ce degré d'association est fondé sur un calcul de probabilité utilisant une loi hypergéométrique et traduit l'écart à une hypothèse nulle dans laquelle les arêtes entre espèces sont distribuées de manière aléatoire. Cette métrique de co-occurrence entre espèces est utilisée comme une indication de leur proximité écologique. Autrement dit, plus deux espèces se retrouvent dans les mêmes relevés, plus leurs exigences écologiques sont proches. C'est l'ensemble de tous ces liens de co-occurrence entre espèces qui définit de manière univoque le réseau espèce.

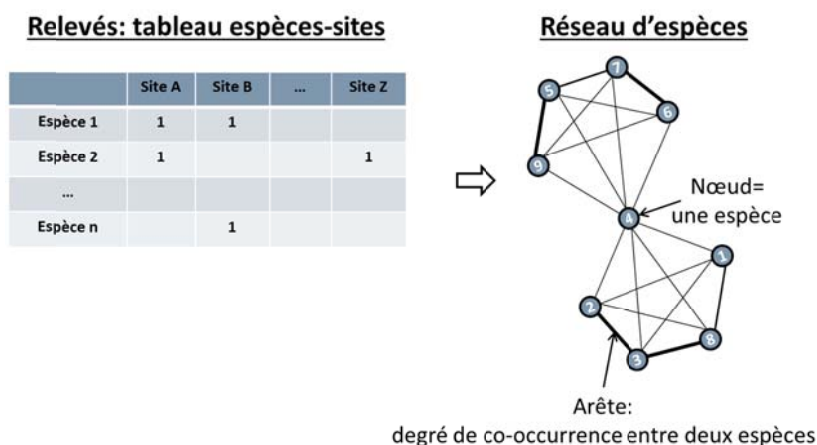


Figure 6: Schéma de principe permettant de transformer le tableau espèces-sites en un réseau espèce.

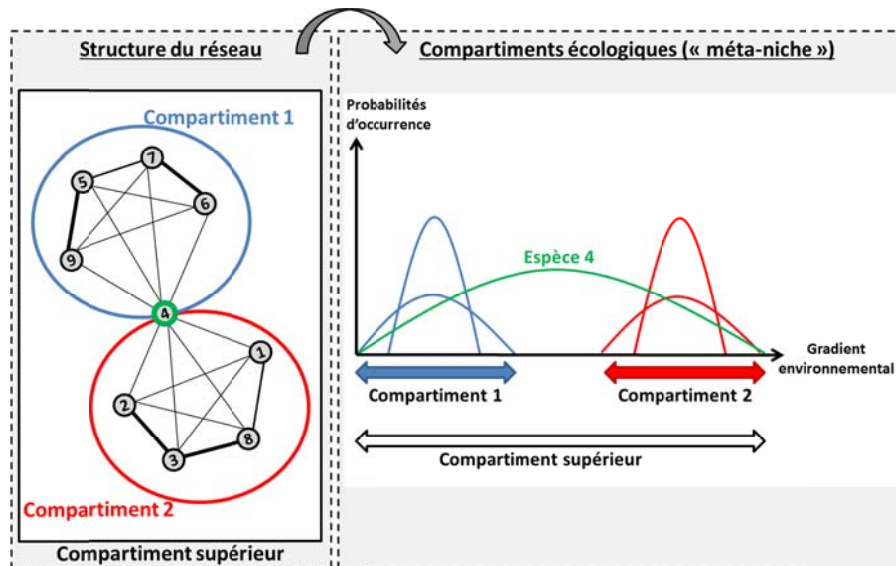


Figure 7: Relation entre les modules du réseau espèces et les exigences écologiques des assemblages d'espèces.

L'analyse du réseau projeté espèce a conduit à définir des modules, c'est à dire des sous-ensembles de réseau qui regroupent des espèces partageant plus de liens entre elles qu'avec les autres. Cette analyse, dite analyse de modularité, permet d'identifier des groupes floristiques que l'on peut rattacher à des exigences écologiques particulières (Fig. 7). Nous avons également caractérisé le rôle des espèces-noeuds dans la topologie du réseau en se basant sur les métriques c et z introduites par Guimera & Amaral (Guimera and Amaral 2005). La métrique z est une mesure de du degré de fidélité d'une espèce à son module. La métrique c traduit la proportion de liens qu'une espèce entretient avec des espèces situées en dehors de son module. Les espèces avec des scores z élevées correspondent souvent à des noeuds entre modules (appelés aussi 'hub'). Une espèce dite "coeur de module" est choisie en maximisant z et en minimisant c . Entre 3 et 5 espèces "coeur de module" ont ainsi été identifiées pour chacun des modules. Un exemple d'analyse est présenté sur la figure 8. Une fois les espèces coeur de module déterminées, l'ensemble des points de relevés sur lesquels ces espèces sont présentes est extrait, et forment ainsi une partition des relevés en fonction des modules.

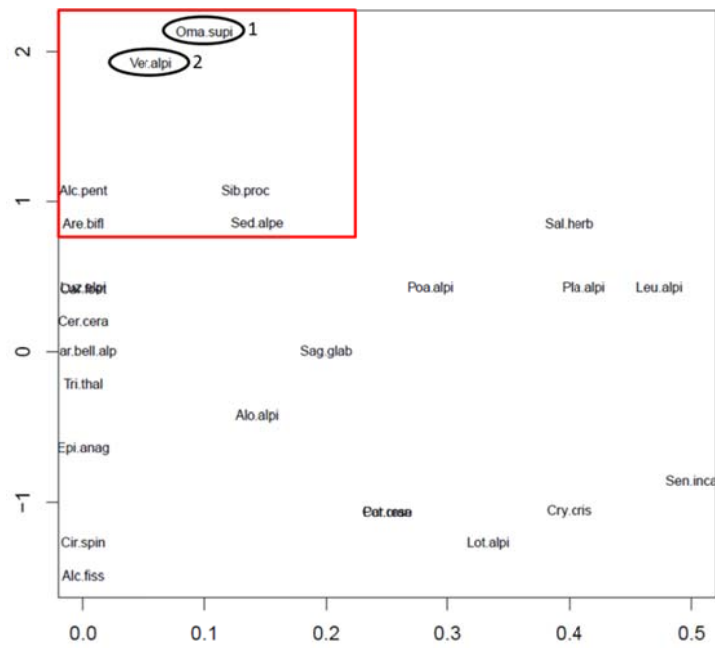


Figure 8. Détermination des espèces "cœur de module" pour un module correspondant aux pelouses de l'étage alpin nival d'après les scores *c* (en abscisse) et *z* (en ordonnée).

6 . Résultats

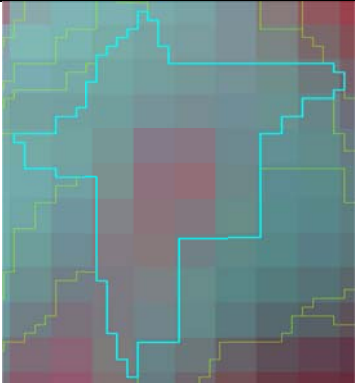
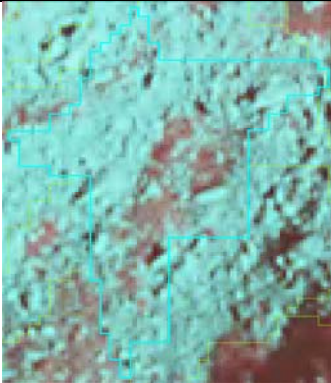
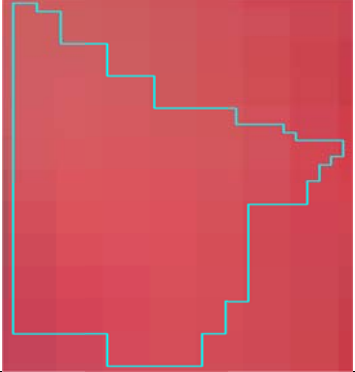
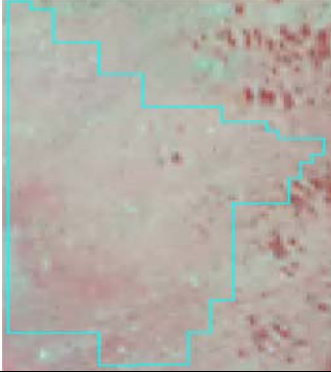
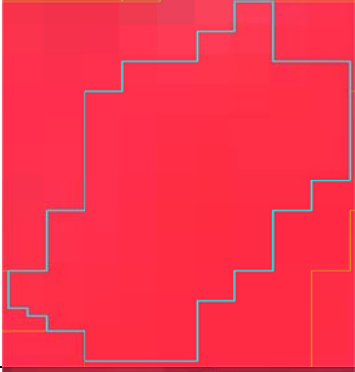
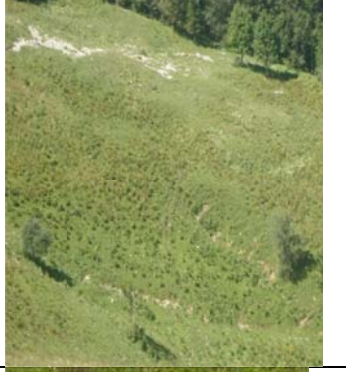
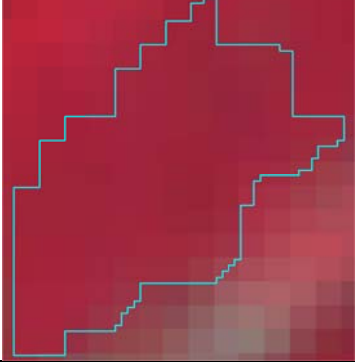
6.1. Typologie physiologique

La typologie physiologique des milieux ouverts d'altitude qui a été retenue comporte 11 classes dont 3 pour les groupements herbacés et 2 pour les formations arbustives. Les principaux critères présidant à cette typologie sont la contribution relative des éléments minéraux et des éléments végétalisés au sein de l'objet, leur configuration spatiale et la densité des couverts végétaux. Ces critères permettent d'inférer des niveaux de productivité des écosystèmes (voir les distinctions sur les groupements herbacés). L'analyse de l'imagerie ne permet pas d'obtenir directement l'ensemble de ces types physiologiques. Le recours à des données physiographiques dérivés d'un modèle numérique de terrain (pente, orientation, etc.) permettent de préciser certains éléments. Au final, les 11 classes se définissent de la manière suivante :

1. Eaux : les surfaces en eau sont extraites de la BD TOPO® de l'IGN
2. Glaciers - Névés : ils correspondent aux neiges éternelles
3. Parois et façades rocheuses : elles correspondent aux zones rocheuses dont la pente dépasse les 45°, végétalisées ou pas.
4. Chaos de blocs - Dalles rocheuses : il s'agit de formations rocheuses faiblement végétalisées et dont la pente est inférieure 25°
5. Eboulis peu ou pas végétalisés : il s'agit de formations minérales, parfois faiblement végétalisées et dont la pente est comprise entre 25 et 45°
6. Eboulis végétalisés : il s'agit de formations minérales dont la pente est comprise entre 25 et 45° et dont la couverture végétale est comprise entre 20 et 50 %
7. **Pelouses de faible productivité** appelée aussi classe **herbacé minéral**: il s'agit de pelouses à faible recouvrement herbacé (pelouses en gradins) ou de pelouses couvrantes mais médiocrement productives (ex : pelouses nivales)
8. **Pelouses de productivité moyenne** : elles correspondent aux pelouses alpines et pâturage d'altitude
9. **Pelouses de forte productivité** : il s'agit des prairies naturelles, de pelouses de bas-marais, et de manière générale les formations herbacées hautes tels que les mégaphorbiaies et les ourlets forestiers.
10. Landes denses : elles correspondent à un recouvrement dominant d'une strate de ligneux bas, le plus souvent de la famille des éricacées.
11. Forêts lâches de résineux : Il s'agit d'une physiologie complexe de pré-bois de résineux (généralement d'Epicéas ou de Pins à crochets). Les strates inférieures ont un recouvrement de landes et pelouses. Seules les classifications orientée-objet sont en mesure de délimiter ce type physiologique hétérogène.

Les caractéristiques radiométriques et texturales de différents types physiologiques sont illustrées dans le tableau 2. L'exemple est basé sur l'analyse de 1 200 zones d'apprentissage et de contrôles qui ont été sélectionnées dans le secteur de Belledonne. La pertinence du choix de ces zones d'entraînement a été préalablement évaluée à l'aide d'un diagramme bi-dimensionnel utilisant les bandes du rouge et du proche infrarouge (Fig. 9) - la présence de végétation augmente la réflectance dans le proche infrarouge (forte réflexion par le parenchyme lacuneux) et diminue celle du rouge (pic d'absorption de la chlorophylle). Ce diagramme permet de contrôler s'il existe

une bonne séparabilité des différentes zones d'entrainement et de voir quelles sont les classes physionomiques où il existe une confusion dans les zones d'entrainement.

Type physiologique	SPOT 6 MS (Infrarouge couleur : R = IR ; V = R ; B = V)	BD IRC	Illustration
Pelouse de faible productivité			
Pelouse de productivité moyenne			
Pelouse de forte productivité			
Lande dense			

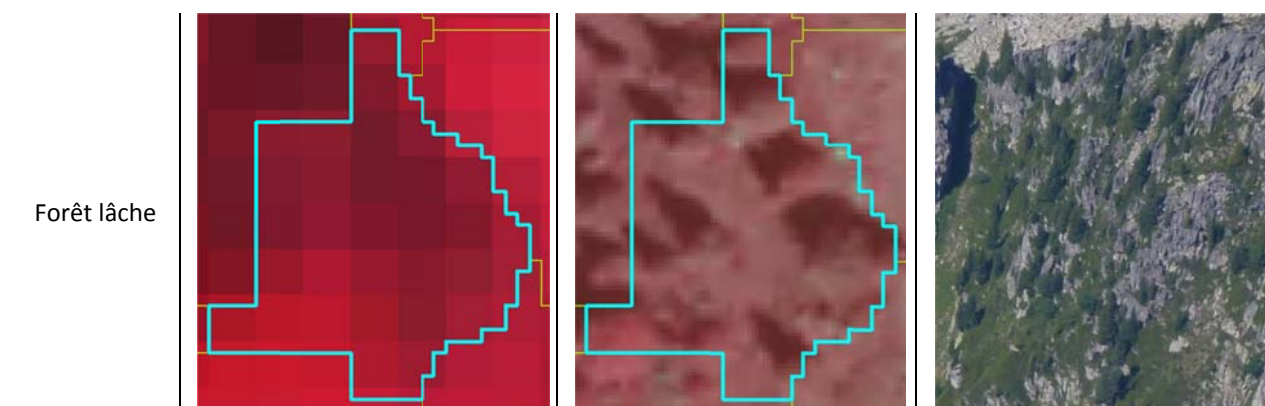


Tableau 2. Caractéristiques radiométriques et texturales de différents types physionomiques identifiés sur le secteur Belledonne

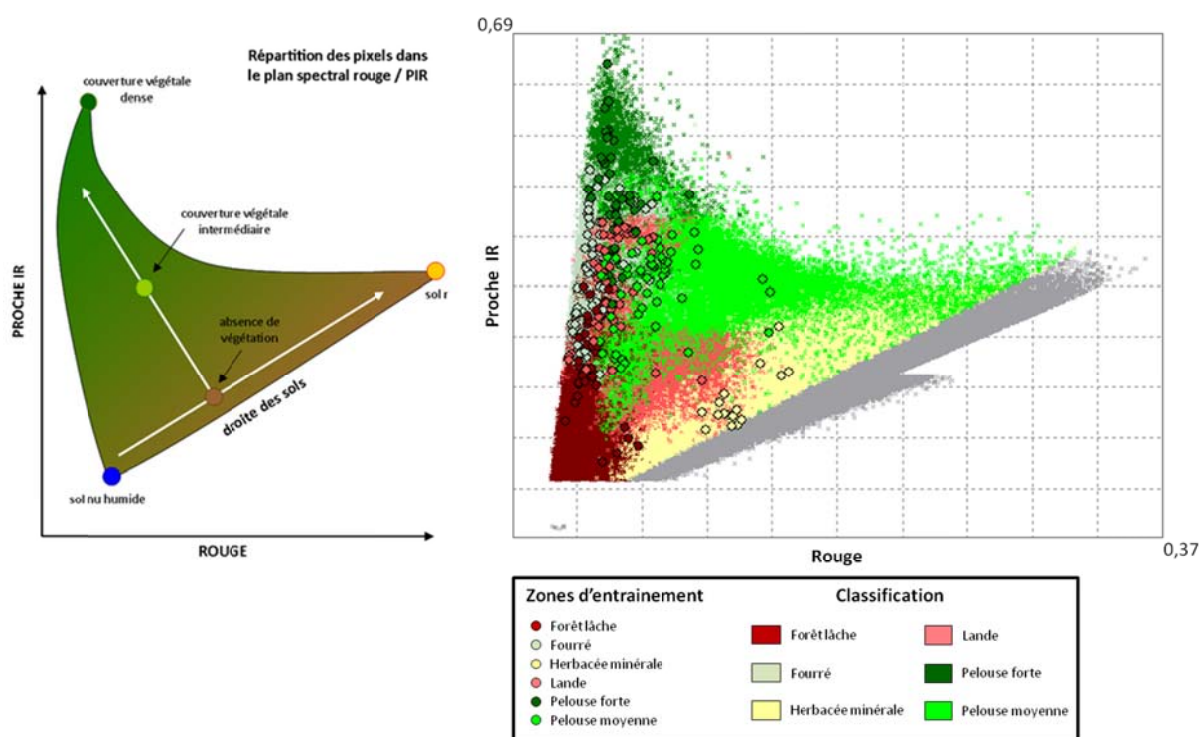


Figure 9. Répartition spectrale des réflectances dans le rouge et le proche infrarouge des zones d'entraînement sélectionnées sur le secteur de Belledonne (Source : ENVCAL, 2014)

La classification physionomique de l'image SPOT 6 a été validée par des prospections terrain et des croisements avec des cartes existantes. La matrice de confusion (Tableau 3) qui confronte la réalité terrain aux classifications de l'image résume cette étape de validation réalisée ici sur le secteur de Belledonne. Tous les types physionomiques sont classés correctement à plus de 70% avec une classification à 100% pour le type « pelouse faiblement productive » et à plus de 80% pour le type « forêt lâche », « lande » et « pelouse fortement productive ». On peut noter une confusion plus importante entre pelouse moyennement et fortement productive de plus de 10%. De même la distinction entre lande dense et fourré arbustif est aussi plus délicate. Ces résultats sont conformes

à ceux obtenus dans de précédents travaux (Brunet et al. 2007, Mondésir 2012, Thierion and Breton 2012, Sitbon 2013).

		Classification						Total %
		Forêt lâche	Fourrés	Pelouse faible.	Lande	Pelouse fort.	Pelouse moyen.	
Terrain	Forêt lâche	97,20%	2,80%	0%	0%	0%	0%	100
	Fourrés	0%	73,79%	0%	24,33%	1,88%	0%	100
	Pelouse faible.	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100
	Lande	0%	0%	6,52%	81,49%	7,49%	4,50%	100
	Pelouse fort.	0%	2,57%	0%	4,30%	81,07%	12,07%	100
	Pelouse moyen.	0%	0%	0%	3,31%	18,32%	78,37%	100

Tableau 3. Matrice de confusion pour la classification finale sur les milieux ouverts d'altitude du massif de Belledonne (en gras les surfaces supérieures à 10%). Pelouse fort.= pelouse de forte productivité. Pelouse moyen. = pelouse de moyenne productivité. Pelouse faible.= pelouse de faible productivité.

6.2. Distribution spatiale des types physionomiques

La figure 10 présente la cartographie physionomique obtenue pour les six secteurs de montagne en utilisant une typologie identique. Des cartes de plus grand format sont réunies dans les annexes 1 à 6 de ce rapport.

A partir de ces cartes, une évaluation des surfaces de chaque type physionomique été réalisée (Tableau 4). Un croisement avec l'information sur la roche mère (de nature siliceuse ou calcaire) a été conduit afin de préciser les correspondances avec le type d'habitat et la floristique. Il ressort de cette analyse que le secteur agro-pastoral herbacé moyennement et fortement productif totalise environ 49 000 hectares (36821 ha et 12287 ha) en Isère. C'est la première fois qu'une estimation aussi précise des surfaces agro-pastorales du département est réalisée.

		Surfaces (ha)						Total	Total par type
Type physionomique	Roche mère	Chartreuse	Vercors	Trièves	Ecrins Est	Ecrins Ouest	Belledonne		
Minéral	calcaire	61	1376	4	3454	1417	171	6483	19942
	silice	0	0	0	3024	8579	1856	13459	
Herbacé minéral	calcaire	891	6654	5	3447	2287	226	13509	28233
	silice	0	0	0	3047	8692	2985	14724	
Pelouse moyennement productive	calcaire	3084	13164	293	7130	2193	659	26523	36821
	silice	0	0	0	2250	3571	4476	10298	
Pelouse fortement productive	calcaire	882	1852	344	538	4038	314	7968	12287
	silice	0	0	0	97	3509	713	4319	
Landes	calcaire	41	76	136	103	1170	455	1981	7712
	silice	0	0	0	63	3006	2662	5731	

Tableau 4. Evaluation des surfaces de chaque type physionomique dans les 6 secteurs de montagne de l'Isère

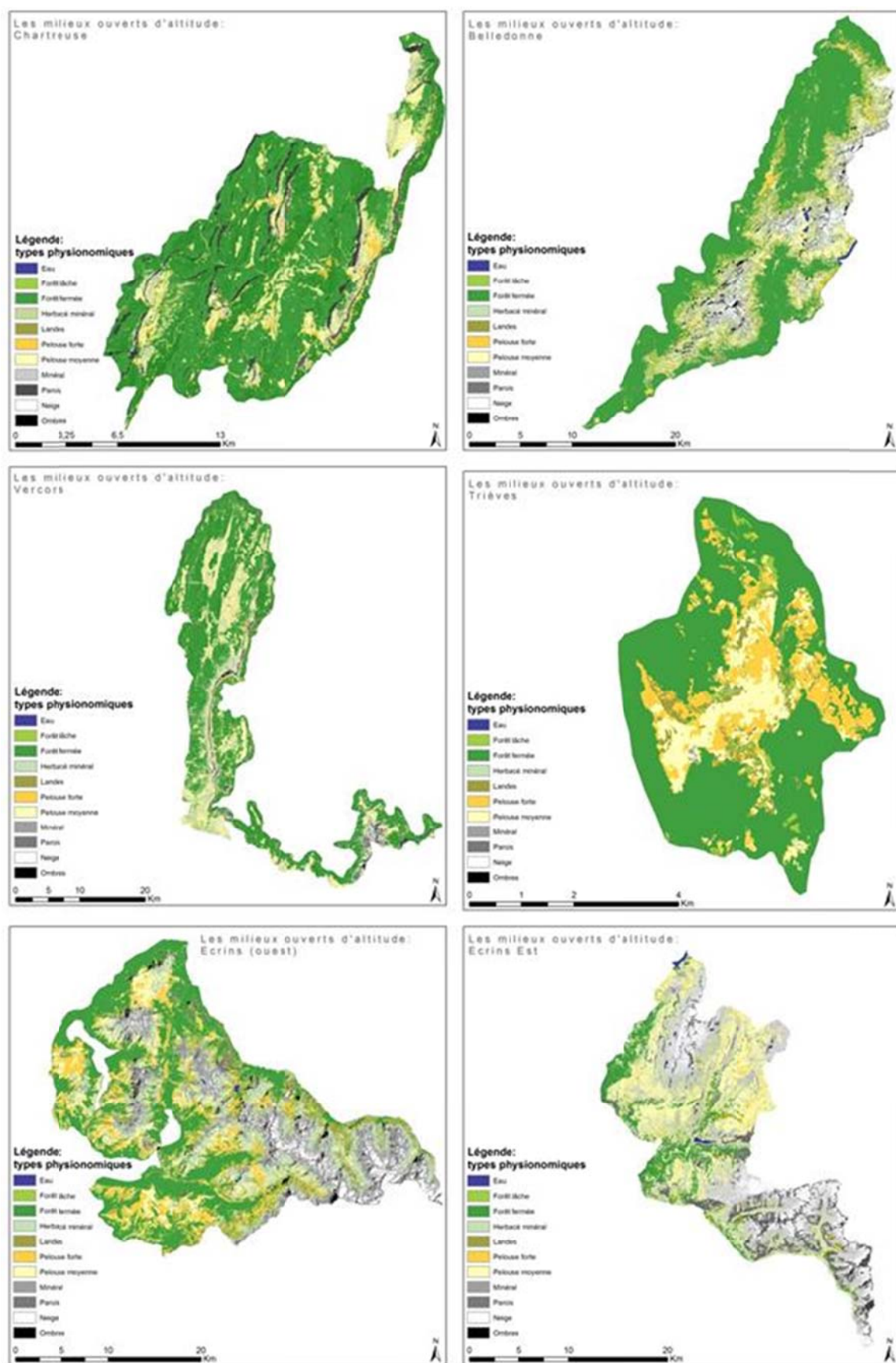


Figure 10. Cartographie des types physiognomiques dans les six secteurs de montagne de l'Isère

6.3. Diversité floristique

La figure 11 présente le réseau d'espèces constitué à partir de l'analyse des relevés de végétation réalisés dans les massifs cristallins externes. L'analyse de modularité de ce réseau a permis d'identifier 5 modules principaux.

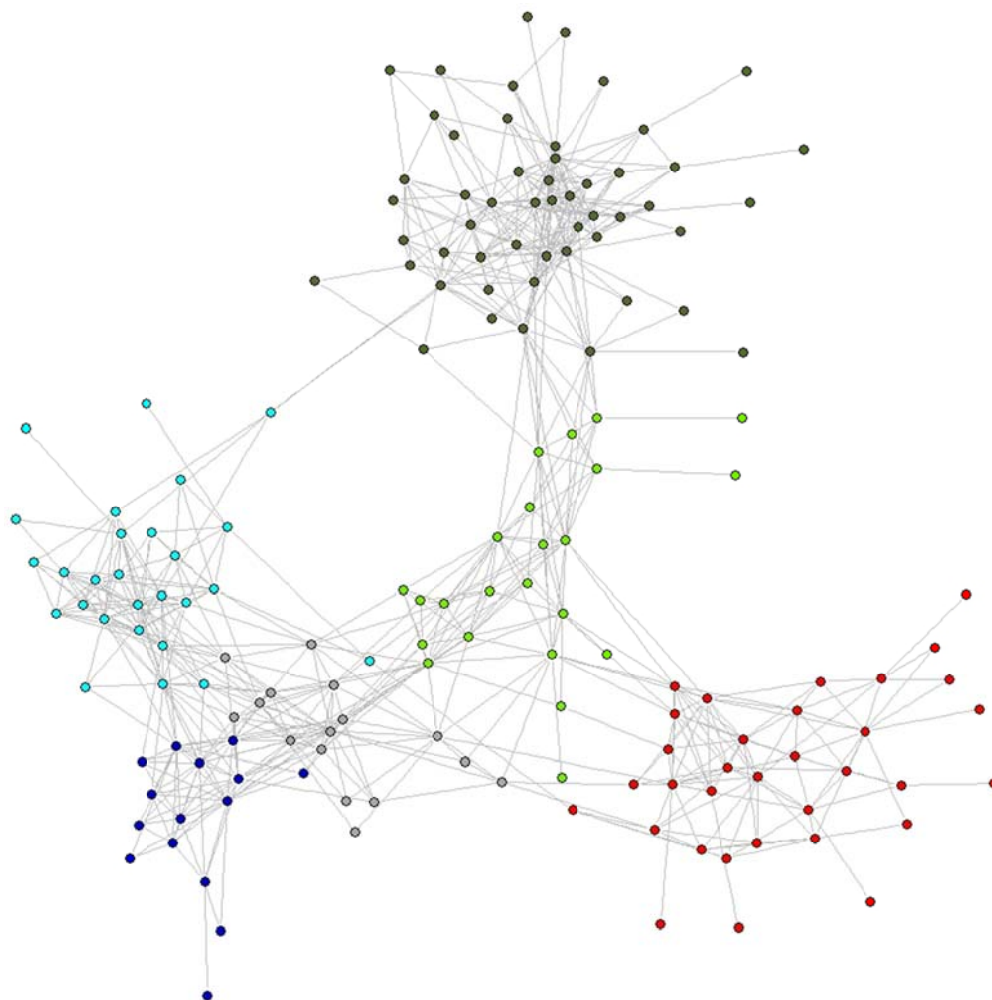


Figure 11: Réseau espèce correspondant à la végétation des massifs cristallins externes de l'Isère avec les 5 principaux modules identifiés: module1 en vert foncé, module 2 en vert clair, module 3 en rouge, module 4 en bleu clair, module 5 en bleu foncé, en gris un module intermédiaire non modélisé.

Les 5 modules identifiés sont indicateurs de milieux de:

- de type « mégaphorbiaie », avec des espèces bio-indicatrices du compartiment phyto-écologique de l'étage sub-alpin frais et humide : **module 1** (espèces : *Agrostis agrostiflora*, *Imperatoria ostruthium*) ;
- de type « Nardaie », avec des espèces bio-indicatrices du compartiment phyto-écologique de l'étage sub-alpin mésophile : **module 2** (espèces : *Arnica montana*, *Potentilla aurea*, *Pseudorchis albida*) ;
- de type « pelouses thermophiles », avec des espèces bio-indicatrices du compartiment phyto-écologique de l'étage sub-alpin thermophile : **module 3** (espèces : *Potentilla grandiflora*, *Senecio doronicum*, *Centaurea uniflora*) ;
- de type « combes à neige », avec des espèces bio-indicatrices du compartiment phyto-écologique de l'étage alpin chionophile : **module 4** (*Veronica alpina*, *Omalotheca supina*) ;

- de type « crêtes ventées », avec des espèces bio-indicatrices du compartiment phyto-écologique de l'étage alpin cryophile : **module 5** (espèces : *Festuca halleri*, *Minuartia sedoides*).

L'organisation modulaire du réseau est hiérarchique. Des modules plus fins pourraient être identifiés avec la perspective d'une mise en correspondance plus étroite avec des alliances phytosociologiques qui définissent les habitats. Cette analyse est en cours.

Dans un premier temps, nous avons privilégié une typologie suffisamment simple pour tenter d'établir la correspondance avec les types physiologiques obtenus par télédétection (voir partie 6.4).

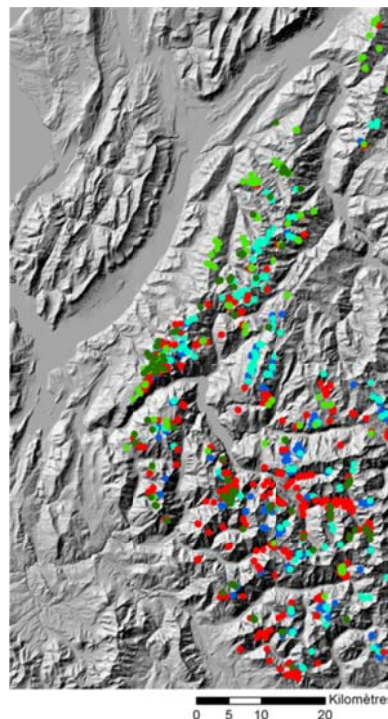


Figure 12: Distribution spatiale des points de présence des différents modules

Il existe des disparités très nettes dans la distribution spatiale des modules (Fig.12). Ainsi, le module 2 est principalement situé sur la partie Nord-Ouest du secteur de Belledonne. A l'inverse, le module 3 est plus fortement présent dans le massif des Ecrins, et notamment dans sa partie la plus méridionale.

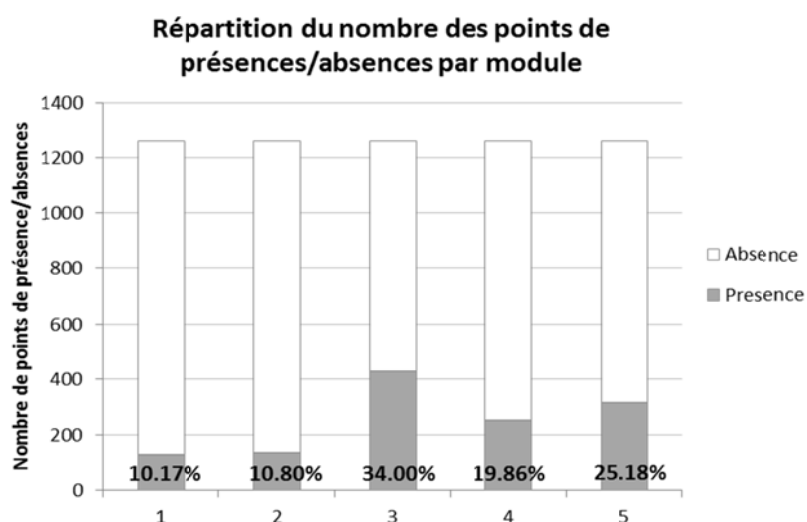


Figure 13: Répartition du nombre de points de présence/absence par module

Le nombre de points de présence est très variable entre les modules (Fig. 13). Le module 3 comprend plus du tiers des points de présence. A l'inverse, les modules 1 et 2 sont les moins représentés avec seulement 10% des points. Ces différences sont liées au choix de la zone d'étude qui se situe majoritairement à l'étage alpin. Cependant, ce graphique fait également apparaître un nombre plus important de points de présence du module 3 (aussi un module du sub-alpin), par rapport à tous les autres modules. Ces points de présence sont majoritairement situés sur le parc national des Ecrins et sur les versants sud du massif de Belledonne.

6.4. Mise en correspondance des typologies

Pour la végétation des massifs cristallins externes, une première mise en correspondance des types physionomiques et des modules floristiques a été proposée (Redon et al. 2012) (Tableau 4). Ce travail a été réalisé sur la zone du lac Blanc. Chaque intersection du tableau liste encore plusieurs habitats potentiels (au sens d'alliances phytosociologiques ici) ce qui permet de bien saisir la difficulté de l'exercice visant à produire des cartes d'habitat sur la base des informations disponibles (imagerie et relevés phyto-écologiques).

Dans la discussion qui suit, nous listons un certain nombre de pistes de travail qui nous apparaissent désormais essentielles pour améliorer cette procédure de cartographie semi-automatisée des végétations d'altitude. Nous pointons en particulier l'important effort de modélisation qu'il serait nécessaire de conduire pour être en mesure de prédire des assemblages d'espèces à l'échelle décamétrique en zone de montagne. Il s'agit assurément d'un front de science en écologie et biogéographie.

Compartiments	"Subalpin frais"	"Subalpin mésophile"	"Subalpin thermophile"	"Alpin chionophile (mode nival)"	"Alpin cryophile (mode thermique)"
Physionomie					
Eboulis, rochers	Androsacion vandellii, Androsacion alpinae, Cryptogrammetum crispae	Cryptogrammetum crispae, (Androsacion alpinae)	Senecionion leucophylli, Cryptogrammetum crispae, Asplenion septentrionalis, Androsacion vandellii	Androsacion alpinae, (Cryptogrammetum crispae)	Androsacion vandellii, Androsacion alpinae
Herbacé - minéral	Adenostylion alliariae p.p., Cryptogrammetum crispae, Agrostietum agrostiflorae	Cryptogrammetum crispae, Nardion strictae	Senecionion leucophylli, Cryptogrammetum crispae, Festucion variae	Androsacion alpinae, Salicion herbaceae, Senecioni incani – Caricetum curvulae, (Cryptogrammetum crispae)	Caricion curvulae, Androsacion alpinae p.p.
Herbacée	Adenostylion alliariae, Agrostietum agrostiflorae	Nardion strictae, Poion alpinae, Rumicion pseudalpini	Festucion variae, Poion alpinae	Salicion herbaceae, Senecioni incani – Caricetum curvulae, Poion supinae	Caricion curvulae
HF	Adenostylion alliariae	Poion alpinae, Rumicion pseudalpini, (Caricion fuscae)	Centaureo uniflorae – Festucetum paniculatae	(Caricetum foetidae, Eriophorion scheuchzeri)	
Landes (rocaillieuses et mixtes)	Vaccinio myrtilli – Rhododendretum ferruginei	Rhododendro ferruginei – Vaccinon myrtilli	Juniperion nanae	(Rhododendro ferruginei – Vaccinon myrtilli)	Loiseleurio procumbentis – Vaccinon uliginosi
Fourré - Fructicée	Alnion viridis, (Vaccinio myrtilli – Rhododendretum ferruginei), nanophanerophytes subalpines (Adenostylion alliariae)	"Jeunes épicea et nanophanerophytes subalpines"	"Jeunes épicea et nanophanerophytes subalpines"		
FL	Piceion excelsae p.p., Vaccinon myrtilli – Pinetum cembrae	Piceion excelsae p.p.	Piceion excelsae p.p., Cotoneastro integerrimi – Pinetum uncinatae p.p.		

Tableau 4 – Mise en correspondance des typologies physionomiques et floristiques pour les massifs cristallins externes de l'Isère.

7. Conclusion et perspectives

Le projet CHAMOIS a contribué **au développement de méthodes de cartographie des habitats adaptées aux milieux d'altitude**. L'application de ces méthodologies à l'échelle des montagnes de l'Isère a abouti à la mise en place **d'une base de données environnementale de haute résolution spatiale**. En particulier, les cartes physionomiques produites par le projet permettent pour la première fois une estimation précise des surfaces et de la distribution spatiale des principaux types de formation végétale rencontrés dans les espaces agropastoraux. Cette base de données représente tout à la fois un outil de connaissance du patrimoine naturel du département et d'aide à la décision pour les gestionnaires du territoire.

Trois pistes de travail ouvertes par le projet n'ont pu être explorées faute de temps et de moyen.

7.1. L'établissement d'une meilleure correspondance entre types physionomiques et habitats.

Un certain nombre de données et d'analyses complémentaires doivent être réalisées afin d'affiner les cartes physionomiques et de parfaire la correspondance entre physionomie et habitats.

(i) Une partie des critères utilisés pour les types physionomiques est dépendant du modèle numérique de terrain à 25m ce qui conduit à une dégradation de la résolution spatiale de restitution. Il faudrait ici disposer d'un modèle numérique de terrain de plus haute résolution pour conserver le grain des images SPOT.

(ii) Une meilleure évaluation des surfaces occupées par les prairies semées de moyenne altitude (notamment sur le secteur Vercors) nécessiterait d'utiliser des images multi-dates et/ou les informations du parcellaire agricole.

(iii) Le croisement entre relevés de végétation et les cartes physionomiques s'est révélé beaucoup plus complexe que prévu. En effet, les problèmes de géolocalisation des relevés et le positionnement de beaucoup de ces relevés sur les bords des polygones créent beaucoup d'incertitudes. Il faudrait notamment envisager des procédures en amont permettant de sélectionner des sous-jeux de relevés pouvant être rattachés de manière plus univoque à des types physionomiques en prenant en compte leur emplacement par rapport aux polygones cartographiés.

(iv) Le croisement des cartes physionomiques avec d'autres couches d'information (voir ci-dessous) permettrait d'affiner de subdiviser les classes physionomiques et de faciliter la correspondance avec les typologies d'habitat. Par exemple, l'information sur la longueur de la période sans neige permettrait de subdiviser la physionomie "pelouses" en pelouse de mode thermique, nival et intermédiaire et ainsi de se rapprocher des alliances phytosociologiques telles que définies pour l'étage alpin.

7.2. L'utilisation d'autres couches d'information pour comprendre puis modéliser la distribution spatiale des végétations d'altitude

Plusieurs couches d'information importantes pour la cartographie des milieux ouverts d'altitude n'ont pas été intégrées dans le projet CHAMOIS:

(i) **la dynamique du manteau neigeux** et en particulier la fusion nivale. Les différences de longueur de saison de végétation, déterminées par la durée de période sans neige, constituent une variable écologique essentielle pour qui cherche à modéliser la distribution spatiale des végétations d'altitude (Choler 2005). Aujourd'hui il existe très peu de produits satellites permettant la cartographie de la fusion nivale à l'échelle pertinente pour la végétation de montagne. En 2012, un consortium associant plusieurs laboratoires de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble s'est constitué pour obtenir une série d'images du satellite SPOT4 couvrant un vaste secteur des montagnes du Dauphiné et acquises au cours du printemps et de l'été 2013. Ce projet nommé SPOT4-Take5 a ainsi permis une cartographie haute résolution de la fusion nivale en 2013. Le croisement de cette nouvelle couche d'information avec les typologies physionomiques et la base de données relevés constituerait un prolongement très intéressant du projet CHAMOIS.

(ii) **les données de phénologie**. Une caractérisation des dynamiques saisonnière des indices de végétation (comme le NDVI) permettrait d'affiner les typologies physionomiques. Il existe ici deux pistes de travail: soit intégrer des variables phénologiques (dates du début de croissance, du pic de végétation, vitesse de croissance et de sénescence etc.) dans le processus de segmentation des images, soit subdiviser *a posteriori* chaque type physionomique en utilisant ces variables phénologiques. Une telle analyse est désormais possible dans la mesure où le projet SPOT4-take 5 a également conduit à caractériser à l'échelle métrique une phénologie des milieux d'altitude pour l'année 2013. A l'avenir, d'autres séquences d'image couvrant de nouvelles années pourraient être utilisées si les suites envisagées au projet SPOT4-take 5 obtiennent un avis favorable.

(iii) **les données relatives à l'utilisation des terres**. Tout paysage est le résultat d'une relation entre humains et non-humains. La connaissance des modes d'utilisation des terres (pressions et types de pâturage, fauche etc) sont déterminants pour comprendre la structure et la dynamique des communautés végétales d'altitude. Dans le cas présent, un partenariat avec les organismes en charge du monde agricole (chambres d'agriculture, fédération des alpages de l'Isère) permettrait d'apporter des compléments à l'interprétation des cartographies réalisées.

7.3. Le développement de modèles de distribution spatiale

Les données recueillies dans le cadre de CHAMOIS constituent également une source d'information pour calibrer et valider **des modèles prédictifs de la distribution spatiale des milieux ouverts d'altitude**. Dans le cadre du volet expérimental du projet CarHAB, une première tentative a été réalisée par Denis Maréchal (Maréchal et al. 2014). En prenant en compte quelques variables explicatives (altitude, insolation totale, humidité, indices topographiques), un modèle de distribution spatiale a été développé pour chaque module issu du réseau espèce. Les résultats de ce modèle ont ensuite été croisés avec la cartographie physionomique afin de parfaire les correspondances entre les deux cadres typologiques.

Il existe plusieurs pistes pour approfondir ce premier travail:

- un premier développement consisterait à utiliser des variables écologiques plus pertinentes pour implémenter ces modèles. En particulier, la durée d'enneigement qui conditionne

les bilans radiatifs et les régimes de température du sol constitue une variable clé pour comprendre l'organisation de la végétation d'altitude et devra à terme être intégrée dans les travaux de modélisation;

- un deuxième enjeu serait d'utiliser les cartes physionomiques dérivées de l'analyse d'image pour modifier les probabilités de présence de chaque espèce et affiner la définition des pools d'espèces.

- enfin, une troisième piste de travail serait de réaliser des modèles de distribution pour chaque espèce de la flore iséroise d'altitude et de combiner les différentes couches obtenues pour définir des pools d'espèces par maille. A partir de cette information, des règles d'assemblage fondées sur les réseaux de co-occurrence observée dans le réseau projeté espèce permettraient de simuler des assemblages d'espèces.

Plusieurs de ces pistes ont été discutées dans un article récent du LECA (Carlson et al. 2013), certaines d'entre elles ont déjà été appliquées avec succès sur le massif du Mont-Blanc dans une publication récente du LECA (Carlson & al. 2014). Des travaux en cours s'inscrivant dans le prolongement des projets DivGrass et CARHAB et associant plusieurs laboratoires (AMAP, CEFE, LECA) s'attachent à améliorer ces modèles prédictifs des pools d'espèces et des règles d'assemblage. A terme, le développement de ces modèles permettrait de réaliser des projections sur les dynamiques des milieux d'altitude en réponse aux changements climatiques et aux changements d'utilisation des terres. Un exemple d'application d'une telle recherche a récemment concerné le Parc National des Ecrins (Boulangeat et al. 2012). Les données recueillies dans le projet CHAMOIS complétées par les informations sur la neige, la phénologie et l'utilisation des terres permettraient de calibrer et de valider de tels modèles pour la montagne iséroise.

6. Valorisation et mise à disposition des résultats

Comme aboutissement du projet CHAMOIS, une base de données géographiques est mise à la disposition du Conseil Général de l'Isère. Cette base comprend pour chaque secteur identifié des fichiers au format raster de la typologie physionomique et des variables environnementales dérivées du Modèle Numérique de Terrain. Les travaux qui se poursuivent au LECA et à Irstea dans le cadre de thèses ou d'autres projets financés nous conduiront à **la réactualisation de ces cartes dans les mois qui viennent**. Des liens permanents seront créés pour chacun de ces fichiers sur un site ftp avec accès contrôlé. La conception et la gestion de cette base sont assurées par l'ingénieur géomaticien du Laboratoire d'Ecologie Alpine¹.

Une publication scientifique dans un journal international à comité de lecture est en cours d'écriture. Cette publication présentera les principaux résultats de la typologie et de la cartographie des milieux ouverts d'altitude. Un accent particulier sera porté sur la combinaison heuristique entre analyse d'image haute résolution et l'analyse de partitionnement d'une base de données de relevés de végétation.

Le projet CHAMOIS a été présenté dans plusieurs réunions organisées avec les services scientifiques du Parc Naturel Régional du Vercors et de la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux et

¹ Merci de prendre contact avec Philippe CHOLER, responsable du projet CHAMOIS afin d'organiser les échanges de données.

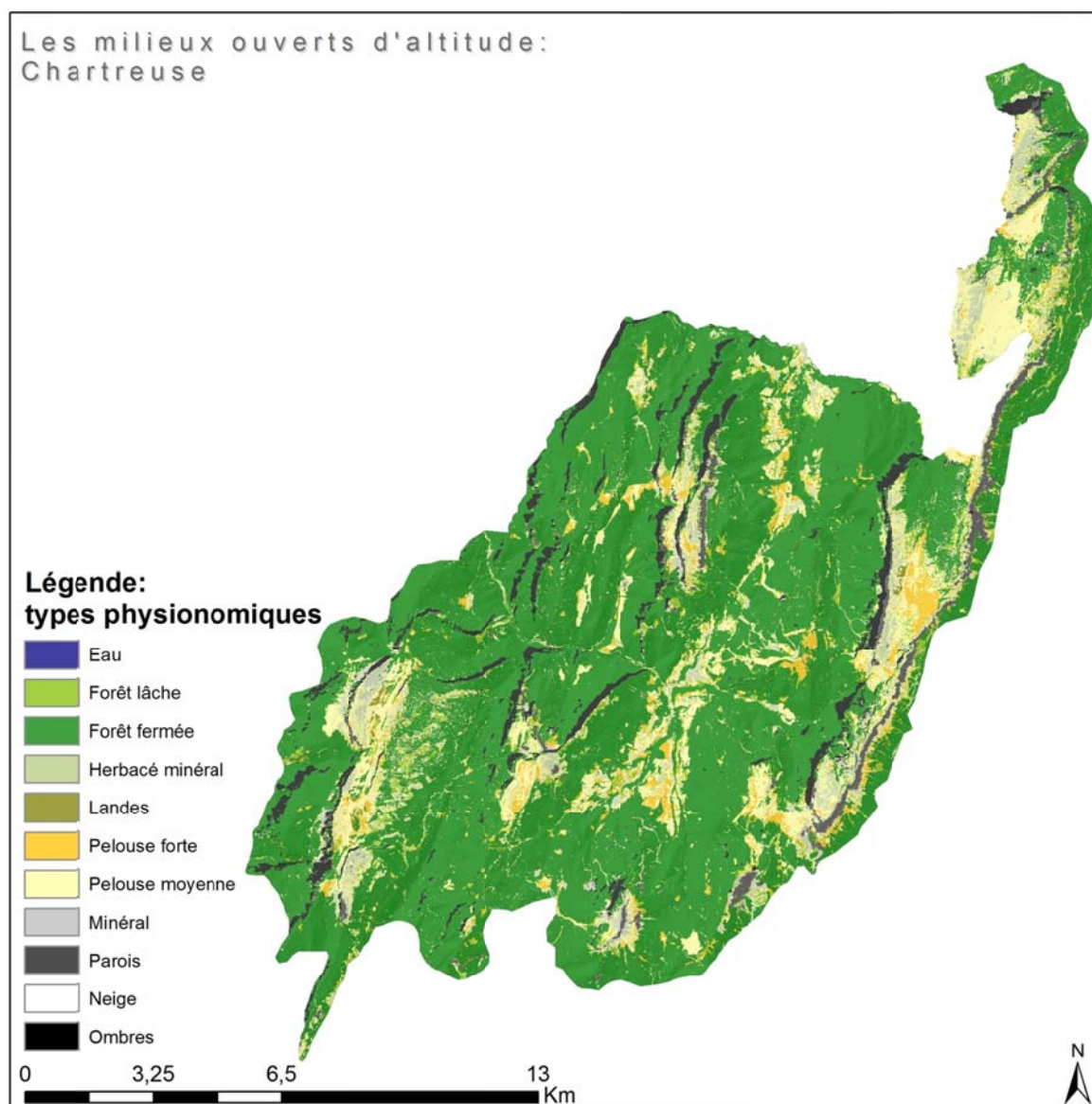
du Parc National des Ecrins. Des échanges ont notamment eu lieu au cours d'un séminaire sur la cartographie de la végétation organisé par le PNE à Molines-en-Champsaur les 27 et 28 novembre 2013.

7. Bibliographie

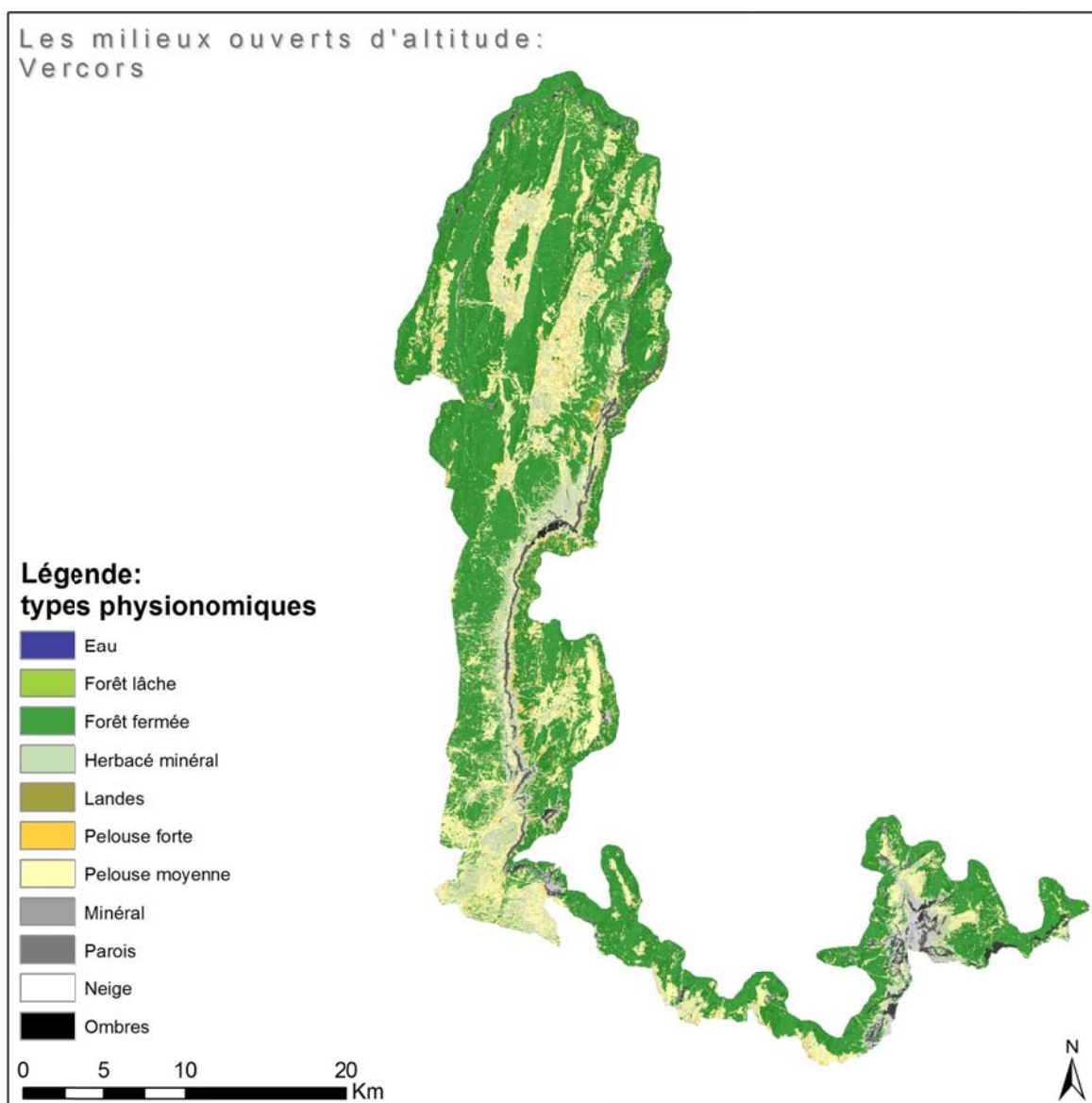
- Baatz, M., and A. Schäpe. 2000. Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **58**:12.
- Benz, U. C., P. Hofmann, G. Willhauck, I. Lingenfelder, and M. Heynen. 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *Photogrammetry & Remote Sensing* **58**:239-258.
- Boulangeat, I., P. Philippe, S. Abdulhak, R. Douzet, L. Garraud, S. Lavergne, S. Lavorel, J. van Es, P. Vittoz, and W. Thuiller. 2012. Improving plant functional groups for dynamic models of biodiversity: at the crossroads between functional and community ecology. *Global Change Biology* **18**:3464-3475.
- Bruehlheide, H., and T. Flintrop. 1994. Arranging phytosociological tables by species-relevé groups. *Journal of Vegetation Science* **5**:311-316.
- Brunet, J.-B., G. Favier, V. Thierion, and M. Lambertin. 2007. Établissement d'une typologie phyto-écologique et d'une typologie agro-écologique globale pour les habitats pastoraux des étages alpins et subalpins du Parc national du Mercantour. Établissement d'une carte des types physiologiques de ces habitats au 1/25000, par télédétection satellitaire, Cemagref – UR Ecosystème montagnard – Centre de Grenoble. 38 p.
- Carlson, B. Z., C. F. Randin, I. Boulangeat, S. Lavergne, W. Thuiller, and P. Choler. 2013. Working toward integrated models of alpine plant distribution. *Alpine Botany* **123**:41-53.
- Choler, P. 2005. Consistent shifts in Alpine plant traits along a mesotopographical gradient. *Arctic Antarctic and Alpine Research* **37**:444-453.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* **37**:35-46.
- Godron, M., and P. Salomez. 1995. DELPHINE : Inventaire et cartographie des milieux, Gap, document scientifique du Parc National des Ecrins n°6, 36 p.
- Guimera, R., and L. A. N. Amaral. 2005. Functional cartography of complex metabolic networks. *Nature* **433**:895-900.
- Maréchal, D., S. Luque, A. Mikolajczak, and M. Isenmann. 2014. Modélisation des compartiments phyto-écologiques des milieux ouverts d'altitude par la théorie des graphes et les modèles de distribution d'espèces. 61 pp IRSTEA, CBNA Report for French ministry in charge of the environment, France.
- Merle, H., and J.-M. Genis. 2005. Cartographie des habitats du PARC Naturel Régional de Chartreuse. <http://87.98.145.175/Record.htm?idlist=3&record=19112252124919304349>.
- Mondésir, J. P. 2012. Utilisation et évaluation des outils de télédétection pour la cartographie des milieux ouverts d'altitude, Mémoire de master 2, Université Paul Sabatier, Toulouse III, Irstea. 70 p.
- Redon, M., M. Isenmann, T. Sanz, and S. Luque. 2012. Prédiction de la distribution d'alliances de végétation des milieux ouverts d'altitude à l'aide de l'approche dite du maximum d'entropie. Livrable n° A.2.3.3 programme CarHAB (MEDDE). 77 pp. Grenoble: IRSTEA, FCBN, CBNA, MEDDE.

- Roig, J. 2014. Cartographie physiologique des milieux ouverts d'altitude alpins par une approche orientée « objet ». Mémoire de Master Professionnel 2ème année. Mention: « Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement ». Grenoble.
- Samuel, A., C. Corbane, M. Deshayes, S. Luque, and M. Redon. 2013. Chapter 6 : Uses and applications of habitat mapping. Pages 77-94 In EEA Technical Report Habitat and vegetation mapping in Europe - an overview. MNHN-EEA report 163 Pages.
- Sitbon, T. 2013. Cartographie physiologique des milieux ouverts d'altitude alpins : Approche multi-échelle et multi-temporelle, Mémoire de master 1, Université Paris Diderot (Paris 7), Irstea. 106 p.
- Thierion, V., and V. Breton. 2012. Apport de la télédétection pour le fond blanc des milieux ouverts d'altitude – Rapport intermédiaire, Projet CarHAB, Irstea. 52p.
- Villaret, J.-C., G. Pache, O. Charlandie, J.-M. Genis, B. Spezzati, N. Dornier, and P. Segura. 2008. Inventaire et cartographie des habitats et espaces naturels. Parc Naturel Régional du Vercors. Rapport final.

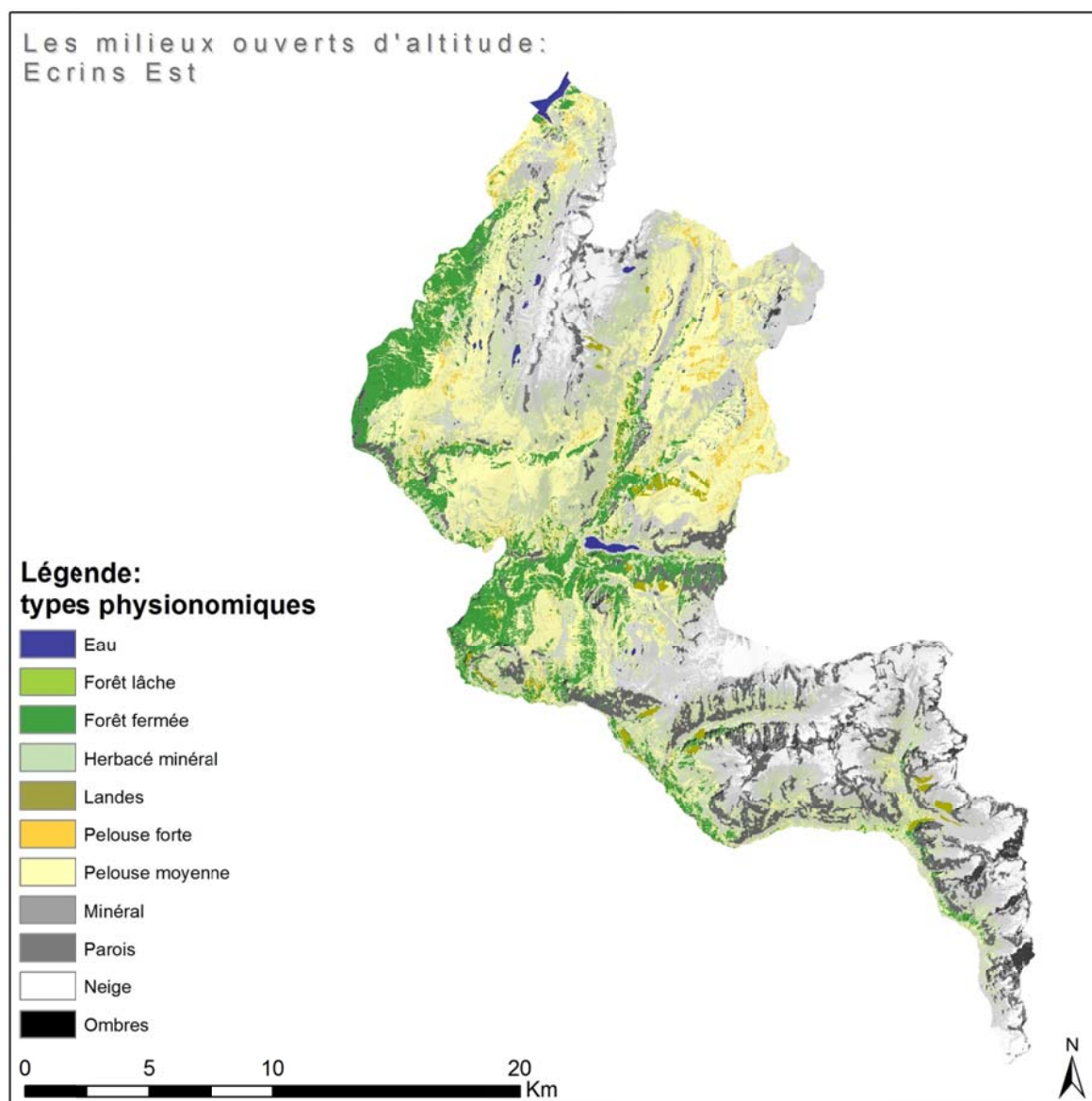
8. Annexes



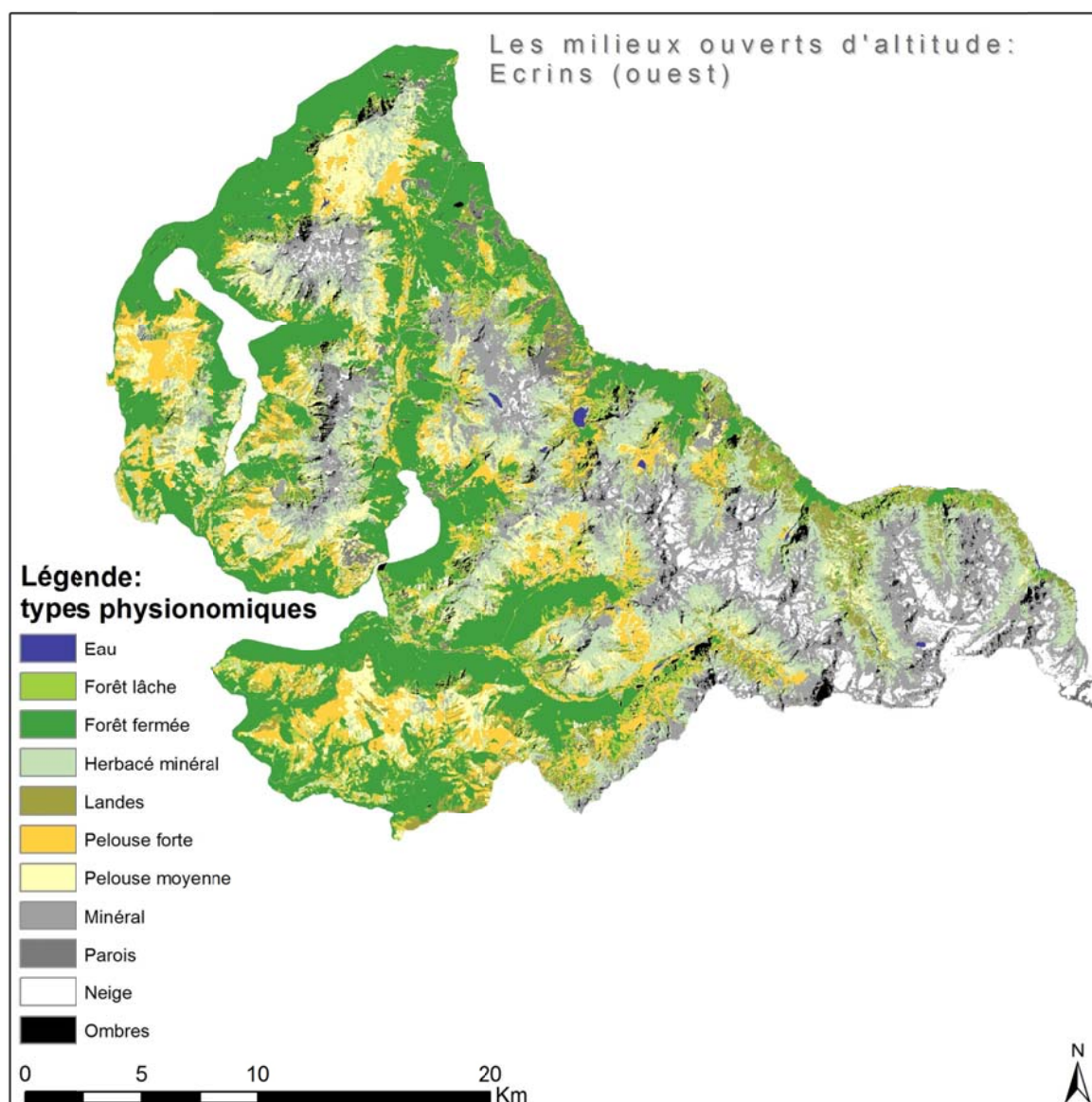
Annexe 1. Cartographie physiologique - secteur Chartreuse



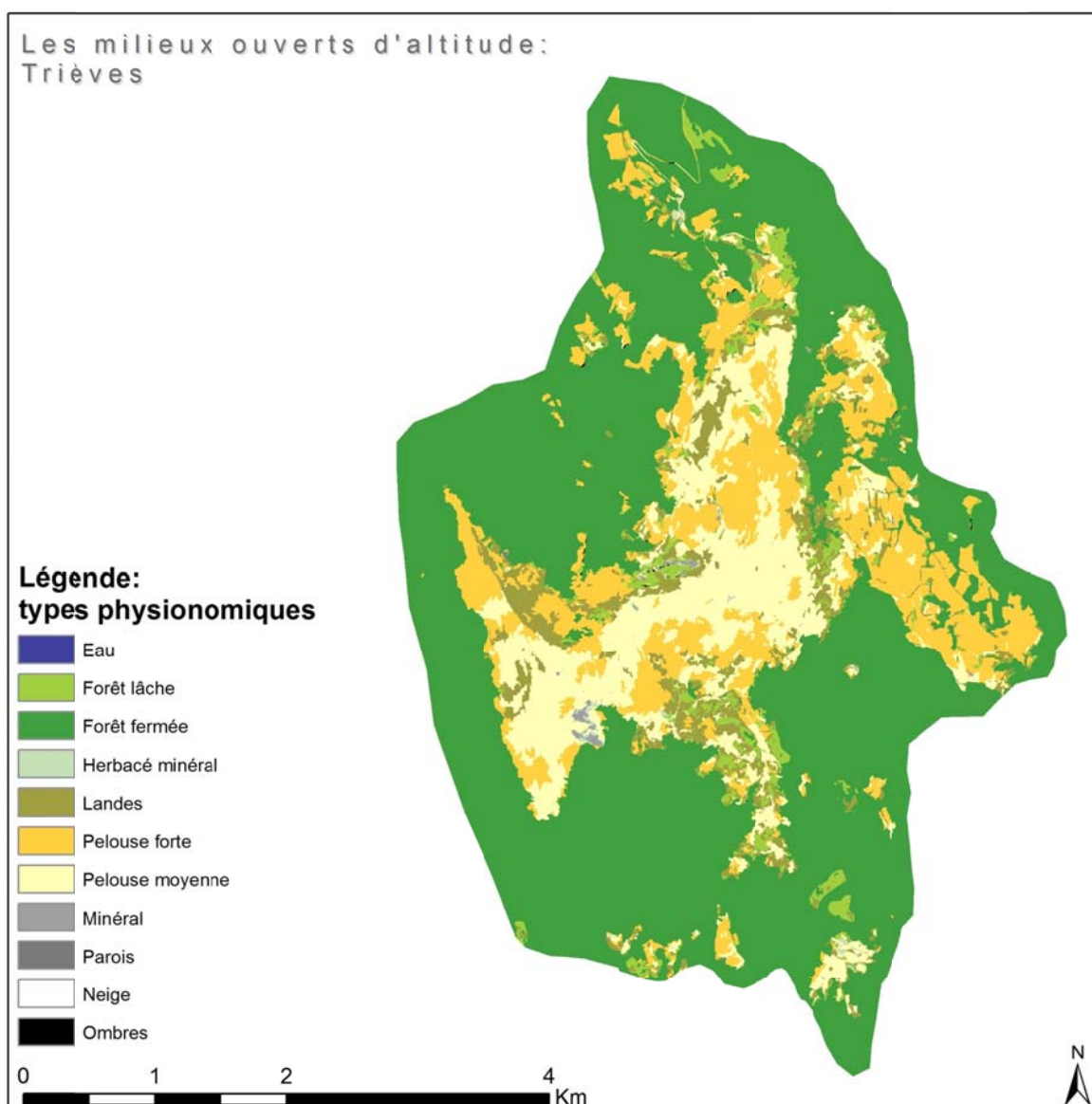
Annexe 2. Cartographie physiologique - secteur Vercors



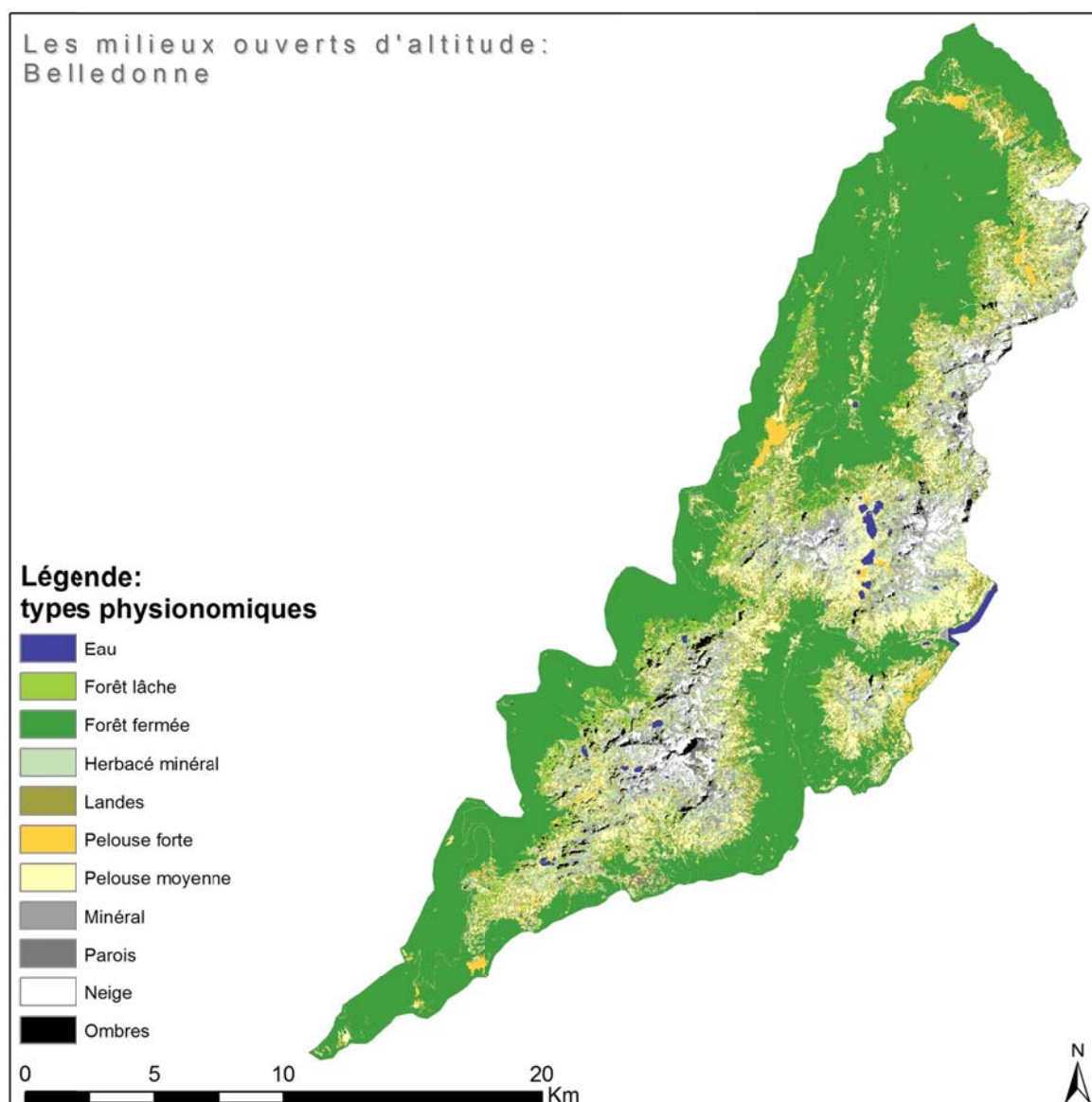
Annexe 3. Cartographie physiologique - secteur Ecrins Est



Annexe 4. Cartographie physiologique - secteur Ecrins Ouest



Annexe 5. Cartographie physiologique - secteur Trièves



Annexe 6. Cartographie physonomique - secteur Belledonne