



**HAL**  
open science

# Recherche de variables contribuant à l'organisation d'un paysage de moyenne montagne : le cas des Hautes Chaumes du Forez

Pierre Olivier Mazagol

► **To cite this version:**

Pierre Olivier Mazagol. Recherche de variables contribuant à l'organisation d'un paysage de moyenne montagne : le cas des Hautes Chaumes du Forez. Géographie. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2006. Français. NNT : . tel-00351560

**HAL Id: tel-00351560**

**<https://theses.hal.science/tel-00351560>**

Submitted on 9 Jan 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Université Jean Monnet de Saint-Étienne**  
**Centre de REcherche en ENvironnement et**  
**AMénagement – CNRS – UMR 5600**

**Thèse de doctorat**

**pour l'obtention du grade de**  
**Docteur de l'Université Jean Monnet de Saint-Étienne**  
**Spécialité : *Information géographique et applications***

**RECHERCHE DE VARIABLES CONTRIBUANT À**  
**L'ORGANISATION D'UN PAYSAGE DE MOYENNE**  
**MONTAGNE**

**Le cas des Hautes Chaumes des Monts du Forez**

Présentée et soutenue publiquement par

**Pierre-Olivier MAZAGOL**

Membres du Jury :

Pierre DUMOLARD	Professeur émérite, Université Joseph Fournier, Grenoble I	Rapporteur
Bernard ETLICHER	Professeur, Université Jean Monnet, Saint-Étienne	Directeur de thèse
Christine JACQUEMINET	Maître de conférence, Université Jean Monnet, St-Étienne	Invitée
Thierry JOLIVEAU	Professeur, Université Jean Monnet, Saint-Étienne	Examineur
Jean-Pierre MARCHAND	Professeur émérite, Université Rennes 2	Rapporteur
Michel PHIPPS	Professeur émérite, Université d'Ottawa	Examineur

---

---

## Remerciements

... à Bernard Etlicher qui a encadré ma thèse.

... à Thierry Joliveau pour ses conseils, sa disponibilité et son regard critique.

... à Michel Phipps pour avoir porté attention sur mon travail, pour ses indications précieuses, pour les modifications qu'il a apportées à Pegase pour que je puisse y traiter mes bases de données. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

... à Pierre Dumolard et Jean-Pierre Marchand pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse.

... à Christine Jacqueminet pour avoir accepté l'invitation à faire partie de mon jury.

... à Carole Bessenay pour ses avis éclairés et ses interventions sur mes cartes et graphiques.

... à Renaud Mayoud pour son excellente administration système et ses talents de programmeur remarquablement rapide.

... à mes collègues du bureau des doctorants Céline, Fatou, Jérôme, Arnaud, Yohann, Alaeddine et aux anciens.

... à tous les autres membres du Crenam ainsi qu'à Crane et Olivier.

... à toutes les âmes charitables qui ont accepté de lire et relire mon travail afin d'en occire le maximum de fautes d'orthographe et de grammaire.

... à mes amis Mathias, Denis et Sabine, Yannick, Alain, Mélanie et Agathe, Fabien et Émilie : votre amitié, votre présence et votre soutien me sont précieux.

... à Shannon, à Sandrine, à Olivier, Nathalie et Zoé, à Béatrice, à Olivier Tit', à LIAR... et à tous les autres que je n'oublie pas...

... à Max et Laurent pour m'avoir fait apparaître dans les remerciements de leur propre thèse... et plus encore.

... aux collègues que j'ai croisés dans les établissements où j'ai enseigné, qui par leur gentillesse et leur bienveillance m'ont aidé et sont devenus mes amis... avec une pensée spéciale pour Anne.

... à Cécile, ma grand-mère.

... à mes parents enfin, à qui je suis reconnaissant de tout.

---

---

## Résumé

Le domaine des Hautes Chaumes, dans les Monts du Forez, est une mosaïque de milieux imbriqués de manière complexe et relevant pour partie d'habitats d'intérêt communautaire. Il subit de fortes contraintes écologiques. Aux traditionnelles activités pastorales d'estive se substituent de nouvelles pratiques agricoles induisant une dynamique naturelle qui permet à la forêt de coloniser les landes. Cette pression anthropique, couplée à une activité touristique importante, conduit à une banalisation biologique et paysagère des biotopes. Cette évolution s'exprime par la diminution de la qualité pastorale des estives entraînant la fermeture des paysages. Tous ces éléments induisent, pour les gestionnaires, un besoin impératif de connaître de quelle façon s'organise le paysage.

Notre recherche s'inscrit dans la lignée de nombreuses études ayant porté sur cet espace et qui nous fournissent de multiples données intéressantes. Elle consiste à mettre en place une méthodologie permettant d'expliquer dans quelle mesure un certain nombre de variables physiques (comme les pentes, les expositions, les courbures...) et anthropiques (pratiques pastorales) exercent des contraintes sur la distribution du couvert végétal.

Afin de dégager les méthodes d'analyses envisageables, une réflexion sur le concept de paysage, notamment écologique, nous a conduit à l'acceptation d'une définition comme « espace transactionnel » animé de multiples processus se développant entre des compartiments abiotiques (variables physiques) et biotiques. Ces derniers forment alors un espace de relation jouant un rôle clef dans le paysage. Le paysage est donc la combinaison de ces trois espaces : abiotique, biotique et de relation se superposant les uns aux autres.

La méthode d'analyse du paysage PEGASE (Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique) développée par Michel Phipps, Professeur émérite du Département de Géographie de l'université d'Ottawa (Canada) s'est imposée. Il s'agit d'une procédure divisive multivariée basée sur les principes de la Théorie de l'information. Celle-ci a pour but la mise en œuvre du concept d'ordre, d'organisation, dans un paysage et d'en donner une mesure. Au cours de l'application de l'algorithme, de nouvelles hypothèses sur le paysage sont définies, puis mises en œuvre et

---

finalement vérifiées expérimentalement par la mesure de l'ordre. L'intérêt de Pegase a déjà été éprouvé dans de nombreuses applications. Mais loin de n'être qu'une application supplémentaire notre recherche se veut innovante.

Tout d'abord, c'est la première fois que Pegase est utilisé pour traiter des bases de données de grandes tailles (méta-bases de données Pegase). Dans ce contexte, l'apparition d'erreurs d'exécution de Pegase a conduit à son amélioration par Michel Phipps. La taille de ces bases de données (grand nombre d'unités et de variables) rendait de plus leur mise en place fastidieuse voire impossible. Cet aspect a induit le développement de deux outils complémentaires annexes à Pegase facilitant et automatisant la structure de bases de données : Asc2Peg et XLPeg. Outre la construction des bases de données, Asc2Peg permet l'utilisation de Pegase dans un contexte S.I.G., puisque qu'il fonctionne à partir de fichiers d'échange ESRI ASCII Grid.

D'autre part, un grand nombre de variables ont des effets potentiels sur la distribution de la végétation. Un des aspects de notre travail a consisté à les identifier. Nous avons parallèlement mis en place un travail d'homogénéisation dans la formulation mathématique de différents indices géomorphométriques, dérivées du premier et du second ordre des modèles numériques de terrains (pentes, expositions, courbures...). De plus, nous avons testé diverses conditions dans l'application de ces formules mathématiques de manière à faire ressortir leur signification sur le terrain.

Enfin, notre méthodologie est basée sur une approche multi-échelle prenant en compte étendue et résolution. Elle montre l'évolution des contributions des variables à l'organisation du paysage en fonction des variations de ces deux composantes de l'échelle. Aucune utilisation de Pegase n'avait, jusqu'alors, été envisagée sous cet angle. Cette approche nous a conduit à mettre en évidence un certain nombre de variables que nous avons qualifiées de « dominantes ».

Ce travail trouve son application auprès des gestionnaires souhaitant étudier un territoire, un paysage afin d'optimiser leur action de restauration ou de préservation, mais également auprès des scientifiques cherchant à identifier des processus écologiques au sein d'un paysage. Il doit leur permettre de sélectionner rapidement les variables à intégrer à leur démarche en fonction de l'échelle à laquelle ils souhaitent ou doivent travailler. Plus généralement, notre recherche met à leur disposition une méthode objective permettant de cerner le plus rapidement possible les caractéristiques et l'organisation de ces paysages en

---

fonction des caractéristiques du terrain et de l'activité humaine..., de collecter un maximum de données pour un coût (en temps et financier) le plus bas possible.

Mais une multitude d'autres applications sont envisageables. Par exemple, notre travail a permis de placer Pegase comme outil potentiel d'aide à la mise en place de cartographies par classification automatique en télédétection.

## Abstract

The Hautes Chaumes area in the Monts du Forez presents a complex mosaic of interdependent environments, including certain habitats of community interest. The area is also subject to strong ecologic and anthropic constraints. Traditional summer pastoral activities have been replaced by new pastoral activities, leading to a natural dynamic that allows the forest to colonize the moors. This stress, along with important tourist activity, leads to simplification of the biology and landscape of the biotopes. This evolution has resulted in the degradation of land quality, and "landscape closing" (reduced visibility due to forest growth). These factors have led land managers to desire better understanding of landscape organization.

This research is in line with the number of studies conducted in this area that have provided us with useful data. Our goal was to develop an approach that would help explain the extent to which physical variables ( i.e. slope, aspect, contour) and anthropic factors (agricultural practices) restrict the distribution of vegetative cover.

To create possible analytical methods, we first reflected on the concept of landscape, particularly from an ecological perspective, leading to the concept of "transactional space," i.e. spaces driven by multiple processes developing between abiotic (physical variables) and biotic components of the landscape. These components form relationships that play a key role in the landscape. Thus landscape mosaics can be seen as a combination of these three spaces: abiotic, biotic, and the overlying relationships between them.

---

Analysis was done using, PEGASE (Partition d'un Ensemble Geographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique), the landscape analysis method developed by Michel Phipps, Professor Emeritus of the University of Ottawa (Canada), Department of Geography. This software applies a divisive multivariate approach based on the principles of Information Theory to implement the idea of order and organization in a landscape and give it a value/measure. While applying the algorithm, new hypotheses regarding the landscape are defined, tested, and finally verified experimentally by measuring the order. The usefulness of PEGASE has already been attested by previous applications, but in our work we innovated on traditional uses of the method in different manners.

Firstly, this is the first time that PEGASE has been used with large databases (PEGASE meta-databases). In this context, execution errors within the program led to its improvement by Michel Phipps. The size of these databases (a large number units and variables) made the tedious process of entering the information unbearable. This led to the development of two supplementary tools associated with PEGASE that facilitate and automate database management: Asc2Peg and XLPeg. In addition to constructing the databases, Asc2Peg allows PEGASE to be used in G.I.S. format because it runs from ESRI ASCII Grid exchange files.

Additionally, there are numerous variables that can potentially affect the distribution of vegetation, one aspect of our work being to identify them. In parallel, we reviewed and standardized the mathematic formulation of various geomorphometric indices – first and second order derivatives of Digital Terrain Models (slope, aspect, contour, etc.). We also tested these formulas under diverse conditions to be able to interpret their underlying signification in the field.

Finally, our methodology is based on a multi-scale approach, taking into account geographic extent and resolution. We demonstrate that the evolution of variable contributions in landscape organization is a function of variations in these two aspects of scale. PEGASE had never been used for this purpose until now. This approach led us to identify a set of variables that we describe as “dominant.”

The approach developed here can be applied by land managers to orient restoration or preservation priorities and measures. It can be equally applied by scientists wishing to identify ecological processes at the heart of a landscape. It will allow them to rapidly select which variables to integrate into their approach as a function of the scale they must or wish

---

to work at. More generally, our research provides an objective method enabling users to readily discern the characteristics and organization of the landscapes as a function of terrain characteristics and human activities. Also, this method makes it possible to obtain a maximum amount of data for little cost in terms of time and expense. Moreover, many other applications of this program are possible. One could analyze the spatial distribution of various phenomena, such as storm or fire damage, or avalanche corridors (risk management), or even an urban mosaic. Our research also showed that PEGASE could be a potentially useful mapping tool when applied to automatic classification of satellite imagery.

---

---

# Table des matières

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Problématique.....</b>	<b>3</b>
1.1 Paysage et Écologie du paysage.....	3
1.1.1 Le paysage : un concept.....	3
1.1.2 Le paysage : un objet écologique.....	5
1.1.3 Le paysage écologique : vers une définition dans le cadre de notre recherche.....	8
1.1.4 Le paysage écologique : vers une conceptualisation dans le cadre de notre recherche.....	10
1.1.5 Le paysage : les notions d'hétérogénéité et d'échelle.....	14
1.1.5.1 L'hétérogénéité.....	14
1.1.5.2 La notion d'échelle.....	16
1.1.6 Les interactions du milieu biotique et du milieu abiotique.....	19
1.2 Hypothèses.....	20
1.3 Objectifs.....	21
1.3.1 L'analyse du terrain d'étude.....	21
1.3.2 Le choix et l'acquisition des certaines variables physiques.....	22
1.3.3 La mise en place d'une méthodologie.....	22
1.3.4 Envisager d'autres applications pour la méthode.....	24
<b>Chapitre 2 : Cas d'étude : les Hautes Chaumes des Monts du Forez.....</b>	<b>25</b>
2.1 Les Parcs Naturels Régionaux.....	25
2.2 Le P.N.R. Livradois-Forez.....	26
2.3 Les Hautes Chaumes.....	27
2.3.1 Les Monts du Forez.....	27
2.3.2 Approche géographique.....	29
2.3.3 Approche climatologique.....	30
2.3.4 Approche écologique.....	30
2.3.5 Une action anthropique marquée.....	34

---

## **Chapitre 3 : Variables et données pour analyser les structures paysagères** .....37

3.1 Variables et paysage.....	37
3.1.1 Les variables physiques.....	37
3.1.1.1 Les facteurs topographiques.....	37
3.1.1.2 Les facteurs hydrologiques.....	40
3.1.1.3 Les facteurs climatiques.....	41
3.1.1.4 Les facteurs géologiques.....	41
3.1.2 Les variables anthropiques.....	42
3.1.2.1 La distances aux chemins.....	42
3.1.2.2 L'activité pastorale.....	43
3.2 Acquisition et présentation des données sélectionnées.....	44
3.2.1 Les outils.....	44
3.2.1.1 Mise en forme des données.....	44
3.2.1.2 Calcul des indices topographiques.....	44
3.2.1.3 La construction des bases de données.....	45
3.2.1.4 Les environnements logiciels.....	45
3.2.2 Les données utilisées.....	46
3.2.2.1 Une variable cible : la végétation.....	46
3.2.2.2 Quarante-neuf variables explicatives.....	48

## **Chapitre 4 : Évaluation critique des données mobilisées.....99**

4.1 Choix d'un site test.....	99
4.2 Mise en place d'un modèle numérique de terrain à l'échelle locale.....	101
4.3 La végétation.....	104
4.3.1 Étude de la classification.....	105
4.3.2 Effet de la variation de la résolution.....	106
4.4 Les principaux indices morphométriques.....	109
4.4.1 L'altitude.....	109
4.4.2 La pente.....	112
4.4.3 L'exposition.....	114
4.4.4 Les courbures horizontale, verticale et d'accumulation.....	116
4.4.5 La rugosité et le relief local relatif.....	120

---

4.4.6 L'activité pastorale.....	123
<b>Chapitre 5 : La méthode Pegase.....</b>	<b>125</b>
5.1 Le processus Pegase.....	125
5.1.1 Les fondements théoriques.....	125
5.1.2 Des applications existantes au modèle Pegase.....	127
5.1.3 Les notions clefs.....	129
5.1.3.1 L'entropie d'information.....	129
5.1.3.2 L'information mutuelle.....	131
5.1.3.3 Le rapport de signification.....	132
5.1.3.4 La redondance R.....	132
5.1.3.5 Le canal d'information.....	133
5.1.4 Un exemple à titre d'illustration.....	136
5.1.5 Déroulement du processus .....	137
5.1.6 Les paramètres d'exécution.....	140
5.1.7 Les résultats fournis.....	141
5.1.8 Les apports de Pegase.....	152
5.1.9 Évaluation de la qualité du modèle.....	153
5.1.9.1 La carte de l'entropie résiduelle.....	153
5.1.9.2 La spécificité des classes de la variable cible.....	154
5.1.9.3 La contribution des variables divisives à la néguentropie.....	154
5.1.9.4 La matrice de succès de la prédiction.....	154
5.1.9.5 Les tests de succès.....	154
5.2 Données et outils.....	158
5.2.1 La structure des bases de données.....	158
5.2.1.1 L'en-tête.....	158
5.2.1.2 Le corps.....	159
5.2.2 Deux outils d'aide à la construction des bases de données Pegase.....	161
5.2.2.1 Asc2Peg.....	161
5.2.2.2 Présentation d'Asc2Peg.....	161
5.2.2.3 Principe de fonctionnement d'Asc2Peg.....	161
5.2.2.4 XLPEg : outil de structuration des en-têtes.....	165
5.2.3 Gestion des données.....	167
5.2.4 Présentation des résultats.....	169

---

5.2.4.1 Un outil de représentation graphique : Gnuplot.....	169
5.2.4.2 Un outil statistique : Biplot.....	169
5.3 L'originalité de notre étude face à celles déjà menées.....	171
<b>Chapitre 6 : Résultats : approche multiéchelles.....</b>	<b>173</b>
6.1 Préparation des données.....	173
6.1.1 Sélection des zones .....	173
6.1.2 Description des zones de niveau I.....	176
6.1.2.1 Description de la zone 1.....	176
6.1.2.2 Description de la zone 2.....	177
6.1.2.3 Description de la zone 3.....	177
6.1.2.4 Description de la zone 4.....	178
6.1.2.5 Description de la zone 5.....	179
6.1.3 Choix des résolutions utilisées.....	180
6.1.4 Reclassement des variables quantitatives.....	180
6.1.5 Quelques compléments sur la présentations des résultats.....	182
6.2 Résultats obtenus pour chaque zone.....	185
6.2.1 Zone 3 de niveau I.....	185
6.2.1.1 Évolution de la redondance.....	185
6.2.1.2 Évolution de la complexité.....	186
6.2.1.3 Évolution de la contribution.....	186
6.2.1.4 Évolution de la spécificité.....	188
6.2.1.5 Évolution des résultats aux tests de succès.....	190
6.2.1.6 Évolution des matrices de succès.....	192
6.2.1.7 Résultats de l'analyse des correspondances.....	194
6.2.2 Zone 3 de niveau II.....	196
6.2.2.1 Évolution de la redondance.....	196
6.2.2.2 Évolution de la complexité.....	197
6.2.2.3 Évolution de la contribution.....	197
6.2.2.4 Évolution de la spécificité.....	199
6.2.2.5 Évolution des résultats aux tests de succès.....	200
6.2.2.6 Évolution des matrices de succès.....	201
6.2.2.7 Résultats de l'analyse des correspondances.....	203

---

6.2.3 Zone 3 de niveau III.....	204
6.2.3.1 Évolution de la redondance.....	204
6.2.3.2 Évolution de la complexité.....	205
6.2.3.3 Évolution de la contribution.....	206
6.2.3.4 Évolution de la spécificité.....	208
6.2.3.5 Évolution des résultats aux tests de succès.....	208
6.2.3.6 Évolution des matrices de succès.....	210
6.2.3.7 Évolution des résultats de l'analyse des correspondances.....	212
6.2.4 Zone 3 de niveau IV.....	213
6.2.4.1 Évolution de la redondance.....	213
6.2.4.2 Évolution de la complexité.....	214
6.2.4.3 Évolution de la contribution.....	214
6.2.4.4 Évolution de la spécificité.....	216
6.2.4.5 Évolution des résultats aux tests de succès.....	217
6.2.4.6 Évolution de l'aspect des matrices de succès.....	218
6.2.4.7 Évolution des résultats de l'analyse des correspondances.....	220
6.2.5 Bilan.....	221
6.3 Effet de l'étendue.....	222
6.3.1 ... en fonction de la résolution pour une zone donnée.....	222
6.3.1.1 Redondance et variation de l'étendue.....	222
6.3.1.2 Complexité et variation de l'étendue.....	223
6.3.1.3 Contribution et variation de l'étendue.....	224
6.3.1.4 Spécificité et variation de l'étendue.....	226
6.3.1.5 Tests de succès et variation de l'étendue.....	228
6.3.2 ... pour une résolution donnée et pour chaque zone.....	231
6.3.2.1 Redondance et complexité.....	231
6.3.2.2 Spécificités.....	232
6.3.3 Bilan.....	232
6.4 Comparaison des résultats avec les autres zones sélectionnées.....	233
6.4.1 Évolution de la redondance en fonction de l'étendue.....	233
6.4.2 Évolution des spécificités en fonction de l'étendue.....	235
6.4.3 Évolution des contributions en fonction de l'étendue.....	237
6.4.4 Bilan.....	241

---

6.5 La base de données Hautes Chaumes : une méta-base de données Pegase.....	241
6.5.1 Chute de l'entropie et augmentation de la complexité.....	242
6.5.2 Les contributions.....	243
6.5.3 Les spécificités.....	244
6.5.4 Matrice de succès.....	245
6.5.5 Tests de succès.....	248
6.5.6 Bilan.....	248
<b>Chapitre 7 : Synthèse et discussion.....</b>	<b>251</b>
7.1 Synthèse des résultats.....	251
7.1.1 Considérations d'ordre général.....	251
7.1.1.1 Le déroulement de la procédure divisive.....	251
7.1.1.2 La redondance et la complexité.....	251
7.1.1.3 La spécificité.....	252
7.1.1.4 Les contributions.....	252
7.1.1.5 Les matrices de succès.....	253
7.1.1.6 Les tests de succès.....	254
7.1.1.7 L'analyse des correspondances.....	254
7.1.2 La mise en évidence de « variables dominantes ».....	255
7.1.3 Le territoire des Hautes Chaumes.....	255
7.1.4 Pegase : outil potentiel d'aide en télédétection.....	257
7.1.5 Les progressions de Pegase au cours de notre recherche.....	257
7.2 Discussion.....	258
7.2.1 Des résultats pas complètement satisfaisants.....	258
7.2.2 La qualité des données.....	259
7.2.3 La variation d'échelle.....	260
7.2.4 Le choix des zones.....	261
7.2.5 Critiques méthodologiques.....	262
<b>Chapitre 8 : Conclusion et perspectives.....</b>	<b>265</b>
8.1 Conclusion.....	265
8.2 Perspectives.....	266
8.2.1 Diversité des applications.....	266
8.2.2 Faciliter l'utilisation de Pegase pour en développer l'utilisation.....	267

---

8.2.3 Utiliser Pegase en télédétection ?.....	268
8.2.3.1 Rappel de quelques principes de la classification par télédétection.....	268
8.2.3.2 Utilisation de Pegase en télédétection.....	270
8.2.4 Pegase et l'approche multiéchelle.....	277
<b>Bibliographie.....</b>	<b>279</b>
<b>Tables des cartes.....</b>	<b>289</b>
<b>Tables des figures.....</b>	<b>293</b>
<b>Listes des tableaux.....</b>	<b>301</b>



## Introduction

En France, depuis quelques années, le paysage est au centre des problématiques de gestion du territoire. Les parcs naturels nationaux ou régionaux, les régions (et même certaines communes ou communautés de communes) souhaitent mettre en valeur leur paysage. Cet engouement soudain est dû à la « loi paysage » no 93-24 du 8 janvier 1993 sur la protection et la mise en valeur des paysages et qui modifie certaines dispositions législatives en matière d'enquêtes publiques. Cette loi propose une série de mesures destinées à une meilleure intégration des aménagements et donne un statut officiel au paysage. Elle comporte trois grands points :

- Elle modifie les dispositions législatives en matière d'enquête d'utilité publique afin de proposer une meilleure concertation autour des projets d'aménagement, et élargit ainsi les possibilités de débat autour des projets publics ;
- Elle complète le code d'urbanisme en matière de permis de construire, demandant une étude de l'insertion dans l'environnement et de l'impact visuel des nouveaux bâtiments et de leurs abords. Ces dispositions, assorties de mesures d'incitations fiscales et réglementaires, visent à préserver la « qualité paysagère » dans les campagnes lors des opérations de remembrement, aux abords des villes en expansion, sur le littoral ou en montagne ;
- Elle complète les dispositifs de protection, élargissant les compétences du Conservatoire du littoral, renforçant les chartes des parcs naturels régionaux, et définissant des Zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP). Elle implique un inventaire régional du patrimoine paysager, sans toutefois proposer des critères d'évaluation des zones à protéger. Elle ouvre la voie à une politique de préservation et de reconquête des paysages. Les textes ultérieurs proposent l'établissement de « contrats de paysage » avec les collectivités locales, permettant l'insertion de constructions nouvelles et la valorisation du décor rural.

Cette loi traduit le glissement d'une analyse des grands paysages, des grands sites touristiques vers le « tout » paysage. Tout espace rural ou urbain devient un paysage à prendre en compte dans l'aménagement (Veyret 1999).

Ces structures sont demandeuses de travaux sur leurs paysages et surtout de techniques d'évaluation et de compréhension. Mais pour gérer, il faut d'abord connaître. Or, la notion même de paysage est soumise à une grande diversité d'approches, et selon l'optique adoptée, la mise en place de l'analyse à mener sera différente. Cette approche peut en effet être « sociologique et culturelle » ou « bio-géo-physique ».

C'est cette dernière que nous avons privilégiée dans le cadre de notre travail. Plus précisément, nous avons choisi d'aborder la notion de paysage dans son acceptation écologique. Son analyse devient alors chose complexe tant les processus qui en sont le siège sont divers et difficiles à appréhender.

Nous nous proposons donc, dans un premier temps de faire le point sur cette notion de paysage afin d'aboutir à la mise en place d'une définition à partir de laquelle nous pourrions proposer une méthode objective d'analyse permettant de cerner le plus rapidement possible les caractéristiques et l'organisation du paysage, connaissances nécessaires à toute bonne gestion de l'espace.

# Chapitre 1 : Problématique

## 1.1 Paysage et Écologie du paysage

### 1.1.1 Le paysage : un concept

Vouloir étudier un paysage, mettre à jour les règles qui régissent son organisation présuppose d'avoir mis en place une définition de ce que l'on entend par paysage.

En parcourant la littérature, on s'aperçoit rapidement que ce n'est pas chose facile. Les définitions sont multiples, parfois contradictoires, toujours inhérentes aux disciplines, aux utilisations et aux cibles auxquelles elles sont destinées.

L'approche la plus simple est de prendre un dictionnaire. On y découvre que le paysage est une étendue de pays qui présente une vue d'ensemble (Larousse), une partie de pays que la nature présente à l'œil qui la regarde (Petit Robert) ou encore une étendue d'un pays que l'on voit d'un seul aspect (Littré).

Le paysage est donc d'abord un lieu soumis au regard (Veyret et Lemaître 1996). C'est ce que l'on voit (Neuray 1982).

Par extension, le paysage devient la physionomie d'un espace qu'on embrasse du regard ou celle d'une contrée que l'on traverse, parcourt ou survole (Noirfalise 1988).

Georges Bertrand ajoute que si le paysage est bien ce que l'on voit, on ne le voit jamais directement, on ne le voit jamais isolément et on ne le voit jamais pour la première fois (Bertrand 1978) cherchant à réhabiliter les représentations sociales dans les recherches géographiques (Béringuier *et al.* 1999).

Le paysage est donc essentiellement la modalité visuelle de notre relation à l'environnement (Berque 1994). Mais on peut également lui ajouter des modalités sonores, olfactives.

Malgré tout, il semble évident que le paysage ne se réduit pas aux données visuelles du monde qui nous entoure. Il fait en effet entrer la subjectivité de l'observateur, subjectivité qui est davantage qu'un simple point de vue optique.

L'étude paysagère est donc autre chose qu'une morphologie de l'environnement (Berque 1994). Elle fait entrer en jeu la perception qu'a l'observateur du paysage. D'autre part, il est important de préciser que ce paysage se rapporte à des objets concrets qui évoluent, modifiant à la fois le paysage, et donc, la perception que l'on peut en avoir. Ces objets ont des origines naturelles (landes, relief...), anthropiques (cultures, habitation...). Ainsi, au-delà de cette subjectivité, apparaît alors la notion d'objectivité.

Le paysage est donc à la fois subjectif et objectif, naturel et culturel, idéal et matériel, individuel et social (Bertrand 1978 ; Bertrand 1992).

Le paysage peut donc être considéré comme un mode particulier de relation entre une société, son espace et la nature (Joliveau 1994). Le paysage se situe ainsi à la charnière entre un objet : l'espace, le lieu et un sujet : l'observateur (Berque 1991).

Ainsi, inscrit dans la Convention européenne du paysage, signée à Florence le 20 octobre 2000, le paysage apparaît comme une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations.

Thierry Joliveau avance que, dans une optique de gestion paysagère, le paysage doit être pensé comme un système complexe de relations, articulant au moins trois composantes interdépendantes (Joliveau 1994) :

- Le paysage espace-support : il s'agit d'un espace concret, rempli d'objets matériels, mais structuré par des forces qui ne le sont pas toujours. C'est aussi un territoire, pratiqué et approprié par différents groupes sociaux (Joliveau 1994) ;
- Le paysage espace-visible : si le paysage est un spectacle perçu du dedans et qui touche à l'intime de chacun, la série continue des paysages existe néanmoins et constitue un espace visible tout à fait cartographiable (Wieber 1987) ;

- Le paysage représentation : dans cet espace-visible potentiel, l'esprit fait un certain nombre de sélections et de tris, valorisant certaines images et en abandonnant d'autres, en fonction d'une histoire et d'une culture individuelle et sociale et surtout en fonction des pratiques que peuvent avoir les observateurs de l'espace support, c'est à dire de leur espace vécu, de leur territoire (Joliveau 1994).

L'étude de ce système nécessite donc l'interdisciplinarité. Il est nécessaire de réunir, autour de la notion de paysage, les différentes pratiques de la géographie (Bertrand 1968), et d'autres disciplines telles que l'écologie, la géologie, l'hydrologie ou encore la sociologie, l'économie...

L'intégration des composantes biophysiques dans ce concept se fait au sein de la composante paysage espace-support. Ce dernier ou paysage-objet résulte en effet de l'interaction entre le support géographique, les dynamiques naturelles, physiques ou biologiques, et les pratiques humaines.

En effet, le paysage n'est pas la simple addition d'éléments géographiques disparates (Bertrand 1968). Il ne s'agit pas seulement du paysage naturel, mais d'un paysage intégrant toutes les séquelles de l'action anthropique (Bertrand 1968). Le paysage est un tout, intégrant l'action de l'Homme, dont il est nécessaire de débrouiller les relations causales (Rougerie 1969), les aspects naturel et anthropique étant les deux versants d'une même réalité (Bertrand 1978).

Étudier l'organisation spatiale d'un paysage, mettre en évidence ses différentes composantes et leurs relations, c'est étudier ce paysage espace-support. C'est à lui que nous nous intéresserons. C'est lui que nous appellerons « paysage écologique ».

### 1.1.2 Le paysage : un objet écologique

La diversité des recherches sur le paysage est donc avant tout dépendante de leur finalité. L'interdisciplinarité permet de redonner une certaine pertinence en tant qu'outil de prospective et d'analyse pour l'aménagement et la gestion des territoires ainsi qu'une plus grande rigueur en tant qu'outil d'acquisition des connaissances (Barrué-Pastor *et al.* 1992).

Au cours de ces dernières années, les écologues se sont réapproprié le paysage. Un glissement s'est opéré de l'« écologie dans le paysage » vers l'« écologie du paysage » (Lefeuvre et Barnaud 1988). L'écologie a fait du paysage une forme d'organisation terminale et une échelle spatiale de rencontre avec d'autres disciplines telles la géographie et la sociologie. Le paysage écologique, contrairement au paysage des sociologues, n'en reste pas moins matériel. Cela permet d'intégrer les notions d'hétérogénéité et d'interactivité entre les différents écosystèmes considérés comme mutuellement dépendants (Blandin et Lamotte 1988).

En écologie du paysage (traduction de la formule anglaise *Landscape Ecology* ou de l'allemand *Landschaftökologie*), le paysage est considéré comme un niveau d'organisation (Baudry 1988). On peut y étudier des phénomènes non perceptibles à d'autres niveaux, en particulier les flux de matière et les déplacements d'espèces animales et végétales entre éléments (bois, haies, champs...). Le fait de considérer le paysage comme un niveau d'organisation et non seulement comme un produit de la société humaine ou le support de contraintes physiques, conduit à lui reconnaître une certaine autonomie, à le percevoir comme un système auto-organisé ayant ses dynamiques propres. D'un point de vue écologique le paysage peut être défini comme une mosaïque organisée d'unités écologiques en interaction.

Trois grands types de problèmes se posent alors (Baudry 1988) :

- L'étude des facteurs écologiques (en interactions avec les facteurs anthropiques) expliquant la structure spatiale des paysages, leur organisation ;
- La description des structures spatiales et de leur évolution ;
- La mise en relation de processus et de dynamiques écologiques avec ces structures spatiales en évolution.

Les paysages écologiques sont donc d'emblée posés comme spatiaux et hétérogènes, nécessitant le développement de nouveaux concepts et d'outils de quantification des phénomènes (mesures d'hétérogénéité, d'organisation...) (Baudry 1988). Un paysage se présente en effet comme un ensemble d'éléments plus ou moins fragmentés ou connectés : c'est la mosaïque paysagère.

Les recherches sur cette dernière ont porté essentiellement sur les effets de taille et la forme des éléments. Un autre aspect concerne la mise en place des mosaïques paysagères, des facteurs qui régulent leurs évolutions ; il existe actuellement des méthodes permettant de mesurer la part de différents groupes de variables dans cette organisation. Parmi ces variables il y a celles qui ont trait aux milieux physiques, aux pratiques agricoles, qui sont elles-mêmes contraintes par les structures spatiales (distance à l'exploitation, taille des parcelles...) (Baudry 1988).

La prise en compte de l'activité humaine devient inévitable dès que l'on se pose le problème de l'organisation. Il n'est en effet plus possible de se réfugier dans des espaces « naturels », du moins dans nos régions. Cette activité ne doit plus être vue comme une source de perturbation mais comme un ensemble de processus faisant partie du système paysager. Cette perspective est fondamentale car elle permet d'appréhender la façon dont on peut agir sur l'évolution du système, ce qui est essentiel pour les opérations d'aménagement et pour la compréhension de l'évolution de l'espace rural.

L'écologie du paysage correspond donc à l'étude de la structure, de la fonction, du développement des éléments (en 3D) contigus du territoire (les écosystèmes locaux) constituant les mosaïques de paysages régionaux. Elle considère également les relations existant entre ces différents éléments. Conceptuellement, l'écologie du paysage étudie le développement et le maintien de l'hétérogénéité spatiale basés sur les processus biotiques et abiotiques, et induit donc une nécessité de gestion de cette hétérogénéité (nous reviendrons plus longuement sur cette notion d'hétérogénéité au chapitre 1.1.5).

L'écologie du paysage n'a pas pour prétention de couvrir l'ensemble du champ de l'écologie : elle intègre, par exemple, les résultats obtenus à d'autres niveaux d'organisation, comme les éléments de la mosaïque paysagère. Elle amène généralement à voir que plusieurs niveaux d'organisation agissent simultanément sur un processus (l'érosion dépend des caractéristiques des parcelles mais également des flux d'eau venant d'autres parcelles, qui, eux, sont régulés par des fossés, talus, bandes herbeuses hors de l'espace cultivé). Cette démarche disciplinaire apparaît comme étant le moyen d'aborder les processus écologiques aux niveaux micro et méso-régionaux (ceux des systèmes agraires) et donc de pouvoir « discuter » avec d'autres disciplines (économie, sociologie, géographie) qui sont presque seules à travailler à ces niveaux.

Mais il est nécessaire de rappeler que l'écologie du paysage n'est pas LA science du paysage, en particulier pour les phénomènes idéaux et symboliques. Les enjeux sociaux sont trop nombreux, les disciplines en jeu trop diverses. L'analyse de la structure et de l'évolution des paysages ne peut être que le fait de programmes de recherche interdisciplinaires (Baudry et Laurent 1993).

### 1.1.3 Le paysage écologique : vers une définition dans le cadre de notre recherche

La notion de paysage s'est considérablement développée ces dernières années. Elle est devenue centrale pour la gestion de l'espace, en particulier pour la protection et la gestion durable du patrimoine naturel et culturel. L'approche des paysages est fortement liée à la relation que nous entretenons avec celui-ci. Elle se doit d'être globale et donc de tenir compte de tous les aspects, tant de la perception, de l'appréciation et de l'identification que des intérêts liés à son utilisation. Dans le cadre de différentes approches qui convergent vers l'écologie du paysage, le paysage a été défini de plusieurs manières. La plupart des chercheurs qui l'utilisent reconnaissent le terme comme étant ambigu. Il s'avère cependant comme une notion indispensable lorsque l'on veut intégrer les unes aux autres les composantes proprement écologiques et les composantes sociales de l'action de l'homme sur les milieux et les ressources.

Au fil des années, les définitions se sont succédé, s'affirmant, s'infirmant, se complétant au fur et à mesure de leur parution :

« Toute portion de la surface du globe constitue ou fait partie d'un paysage. »  
(Ducruc 1985)

« Surface de terrain hétérogène composée d'un assemblage d'écosystèmes en interaction, assemblage répété d'une manière similaire à travers le territoire. »  
(Forman et Godron 1986)

« Entités physiques, écologiques et géographiques, intégrant tous les processus et structures naturels ou causés par l'homme. » (Naveh 1987)

« Une configuration particulière de la topographie, de la couverture végétale, de l'utilisation du sol, la structure de peuplement humain et qui délimite un espace cohérent d'activités et processus naturels et culturels. » (Green *et al.* 1996)

« Partie du territoire qu'on perçoit d'une manière unitaire autour de nous, sans regarder de près les composantes individuelles et qui nous paraît familière. » (Haber cité par Farina (Farina 1998))

« Partie de territoire composée de différents écosystèmes. » (Haber 2004)

Ces définitions, ajoutées à celles citées plus haut, permettent d'individualiser trois approches (Farina 1998) :

- Une approche (géobotanique) selon laquelle le paysage est déterminé par les facteurs environnementaux abiotiques (climat, géologie, morphologie mais aussi pédologie, hydrologie) et biotiques (couverture végétale) ainsi que les facteurs anthropiques ;
- Une approche (animale) centrée sur la perception de l'environnement par un organisme vivant quelconque ;
- Une approche (humaine) centrée sur la perception par l'Homme. Le paysage est formé par des entités fonctionnelles qui ont un sens pour la vie de l'Homme. Cette approche n'est pas toutefois un simple cas particulier de l'approche précédente, puisqu'elle implique des aspects économiques et culturels qui ne sont pas présents chez les autres organismes.

Cette approche humaine décrite par Farina est donc axée sur la perception. Il est cependant intéressant d'y ajouter un aspect en lien aux modes d'actions de l'Homme sur les paysages. En effet, les modes de contrôle matériel de l'« espace humain » sont d'un autre ordre. Et ce sont eux que nous incluons dans notre étude.

Ces trois approches ne sont pas mutuellement exclusives, mais complémentaires. Ainsi, dans la perspective de la gestion de l'espace, la vision centrée sur l'homme et la satisfaction de ses besoins est incontournable. Toutefois, pour pouvoir réaliser une gestion durable du paysage, on doit tenir compte des facteurs et processus abiotiques et biotiques qui structurent le paysage, ainsi que des besoins des organismes vivants.

Il est alors possible de définir le paysage comme un espace hétérogène, cohérent et dynamique qui résulte de la conjonction évolutive de facteurs écologiques, sociaux, culturels et économiques, mais qui est perçu d'une manière unitaire et distincte de ses voisins.

Si l'on cherche à mettre en place une définition plus simple, on peut opter pour la suivante, combinant celle de Forman et Godron en 1986 et celle de Haber en 2004 :

« Partie de territoire composée de différents écosystèmes en interaction ».

Le paysage écologique est donc considéré comme un niveau distinct d'organisation écologique, un système constitué d'une mosaïque d'écosystèmes différents en interaction intégrant des processus naturels et anthropiques, de « nature naturelle », de type biophysique et énergétique.

#### 1.1.4 Le paysage écologique : vers une conceptualisation dans le cadre de notre recherche

Parler d'étude, de modélisation, d'évaluation de paysages nécessite avant toute chose de définir la notion même de paysage telle qu'elle peut être envisagée dans le cadre de notre objet d'étude.

Cette notion a été beaucoup discutée. De nombreux détracteurs ont avancé le fait de trop de subjectivité, voire d'émotivité, échappant à toute approche objective. Cependant, notre approche est on ne peut plus objective.

Elle est à inscrire dans le groupe des approches géobotaniques. Nous partons du principe que tout paysage se divise en deux unités élémentaires : le support physique et sa couverture (Delpoux 1972). Chacune de ces deux unités implique de nombreuses variables écologiques. Le support physique est lié aux caractéristiques géologiques, orographiques, géomorphologiques et édaphiques. La couverture, quant à elle, est liée à des variables biologiques incluant l'action humaine. Tous deux sont le siège de processus écologiques. Le paysage apparaît donc comme un système organisé, propice à l'étude des flux, interactions, relations qui le parcourent (figure 1).

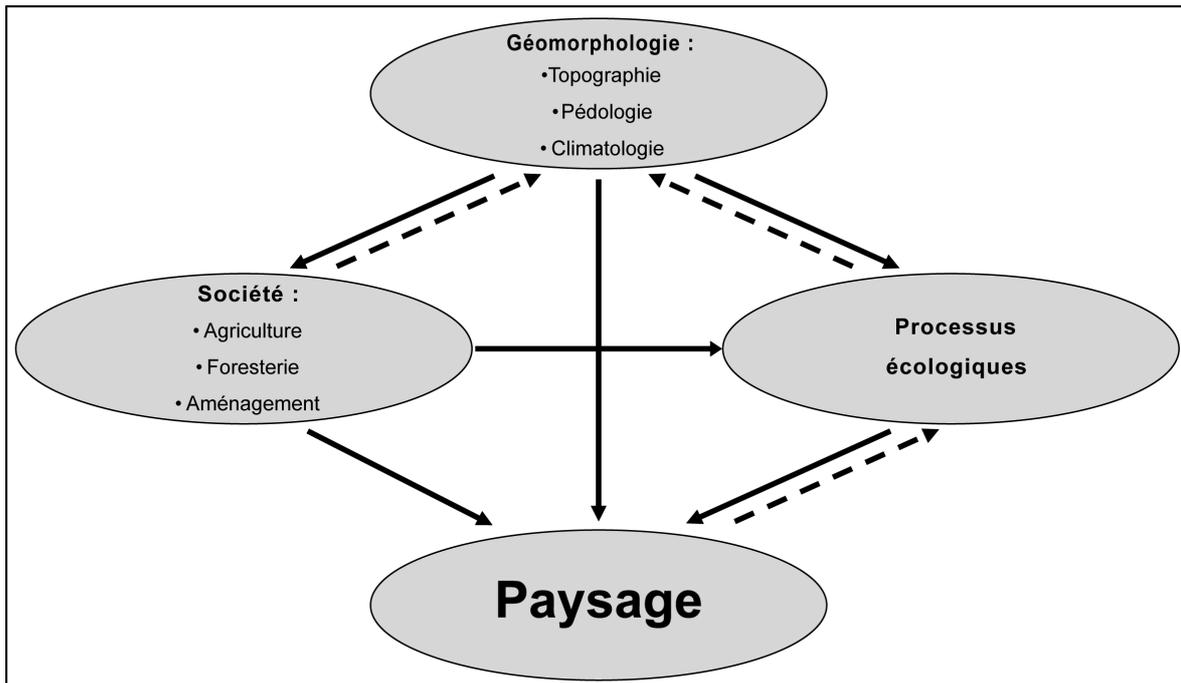


Figure 1 : Schématisation de la notion de paysage

Mais il est possible d'aller plus loin dans la conceptualisation : le paysage peut, en effet, être défini comme un « espace transactionnel » (Hills 1974). Il se développe alors entre les compartiments abiotiques et biotiques de multiples processus. Ces derniers forment alors un espace de relations. L'espace occupe alors un rôle clef dans le paysage. Plus encore, le paysage devient d'essence spatiale (Phipps 1985). Phipps aborde donc le paysage comme une combinaison de ces trois espaces : un espace abiotique, un espace de relations et un espace biotique se superposant les uns aux autres. Cet espace transactionnel est alors vu comme un canal d'information entre, d'une part un ensemble de messages définis à partir des descripteurs abiotiques du milieu et d'autre part un ensemble de messages définis à partir des descripteurs biotiques du milieu (Phipps 1985).

L'ensemble des messages provenant des descripteurs biotiques est facilement obtenu par une classification des différents types d'occupation du sol rencontrés sur le terrain d'étude. En revanche, l'existence d'un grand nombre de descripteurs du milieu abiotique (climatique, édaphiques, topographiques....à) rend le travail complexe.

Ainsi, il note trois intérêts à une telle approche :

- Une telle définition conduit à prendre d'emblée en compte les relations « horizontales », c'est-à-dire les interactions spatiales dont le paysage est le siège, qui ne doivent pas être négligées ;
- Cette définition permet également d'englober à la fois le paysage dit naturel et le paysage transformé par l'homme. En effet, dans le cas d'un paysage transformé par l'homme (comme le paysage rural), la substitution des écosystèmes cultivés aux écosystèmes naturels n'élimine pas pour autant les liens transactionnels : les régulations exercées par les composants biotiques sont remplacées par des contrôles exercés par l'action de l'homme ;
- Enfin, tout cela induit l'intérêt de l'étude de ces interactions dans la compréhension des paysages. En tant que médiateur entre espace biotique et espace abiotique, cet espace de relations (espace abstrait) peut être cerné par l'étude des relations biotiques-abiotiques qui se nouent au sein de l'espace réel.

Ces notions peuvent ainsi être approchées à travers la mise en évidence de contraintes appliquées au système spatial. En effet, s'il existe des relations privilégiées entre certaines caractéristiques abiotiques et certaines formes biotiques observées, elles se traduiront par des contraintes limitant la liberté de localisation spatiale des formes biotiques correspondantes (Phipps 1981). La question qui apparaît alors est celle de la mesure de ces différentes relations dans l'organisation du paysage.

Les éléments du système à définir ne peuvent être que des portions d'espace (ou cellules) de petites extensions, de même forme et de limites arbitraires (Phipps 1985). Ces cellules sont donc avant tout des éléments d'essence purement spatiale. Cependant, l'étude d'un tel système ne doit pas se limiter à ce niveau et considérer l'espace comme simple support topologique n'intervenant que par le biais des notions de proximité, de forme et de taille. Chaque cellule, au sein du système, s'avère en effet posséder des propriétés distinctives et être chargée de forces et de potentialités écologiques. Chacune d'elles est un « être paysagique » à part entière, même si elles ne sont, prises séparément, que des « êtres spatiaux » (figure 2).

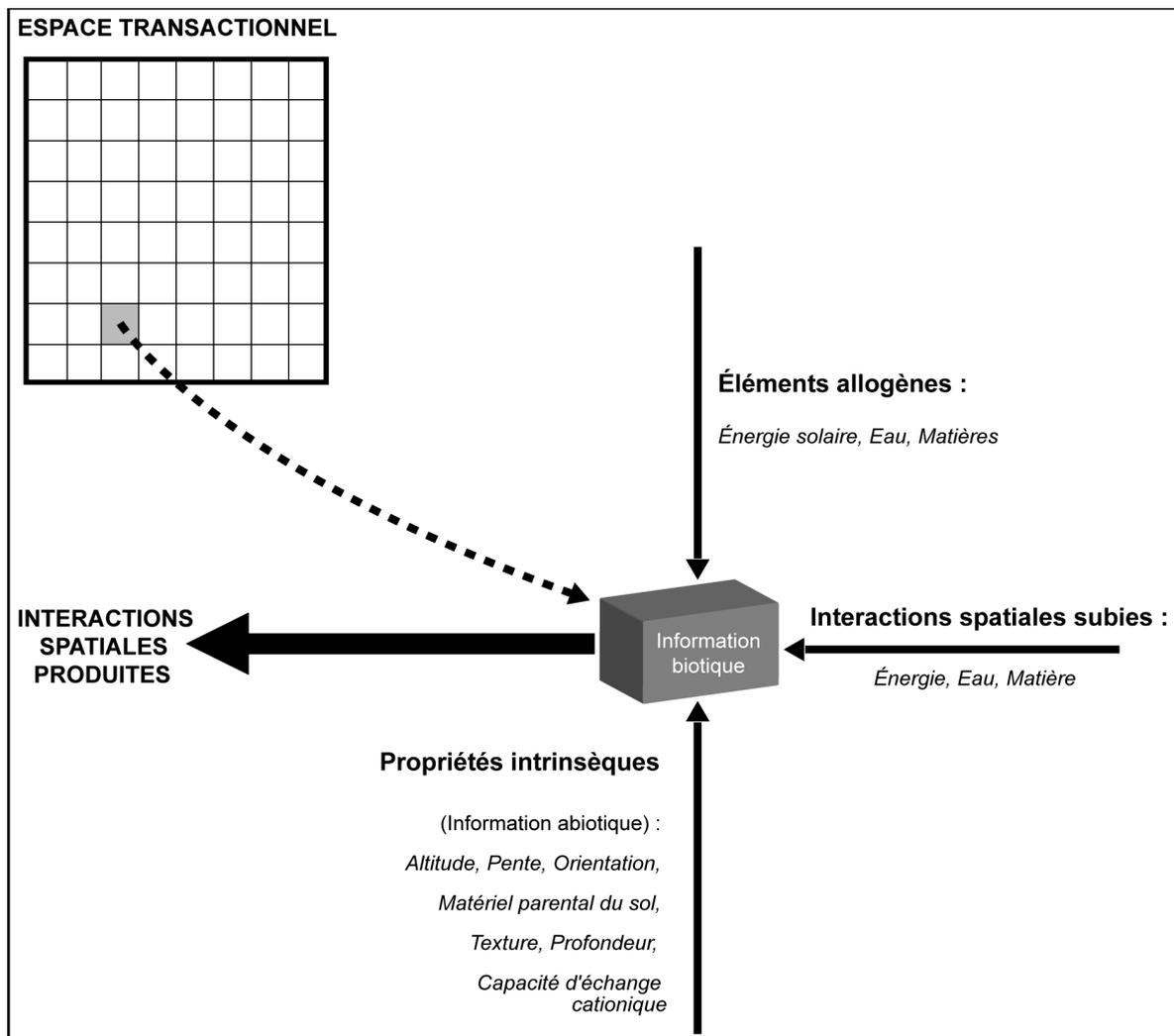


Figure 2 : Illustration du paysage vu comme un système spatial d'unités (cellules) porteuses, réceptrices et productrices d'information (Phipps 1985)

La prise en compte de cellules, plutôt que d'unités naturelles se justifie par deux raisons :

- Le choix des unités naturelles serait biaisé par la prise en compte, avant toute analyse, des propriétés qui influent sa forme, sa taille et sa localisation (propriétés topographiques, climatiques...). Les propriétés spatiales de ces unités découlent en effet de leurs propriétés naturelles. Au contraire, le choix des cellules n'est défini que par les seules caractéristiques topologiques, les autres propriétés n'intervenant qu'en second lieu ;

- Elle permet parallèlement un échantillonnage homogène de ces unités. Un tel découpage imite en quelque sorte celui d'une image en pixels. Il permettra de plus de passer aisément d'un outil à un autre.

On note que ces deux raisons ne sont pas identiques, l'une étant conceptuelle et l'autre technique.

Chaque cellule est donc un support élémentaire d'information qui se comporte à la fois comme :

- Porteur d'information (abiotique) ;
- Récepteur et émetteur d'information (échange d'information avec d'autres cellules) ;
- Producteur d'information (information biotique).

### 1.1.5 Le paysage : les notions d'hétérogénéité et d'échelle

L'étude des paysages par une approche quantitative nécessite la prise en compte de divers indices dont l'hétérogénéité. Cette dernière, avec la notion d'échelle, prend une place importante dans notre méthodologie.

#### 1.1.5.1 L'hétérogénéité

L'hétérogénéité est la distribution inégale, non aléatoire des éléments constituant un paysage (Farina 1998 ; Forman 1995a ; Forman 1995b ; Hansson 1977 ; Odum 1971). Ce dernier se présente comme un ensemble d'éléments plus ou moins fragmentés ou connectés et spatialement hétérogène.

D'un point de vue écologique, Miroslav Mimra (Mimra 1993) cité par Petr Sklenička et Tomáš Lhota (Sklenička et Lhota 2002) avance que l'hétérogénéité du paysage peut être caractérisée par :

- La diversité des éléments du paysage ;
- Le caractère et l'intensité des interactions entre les éléments du paysage ;
- La taille et la forme de ces éléments ;

- La configuration spatiale de ces éléments ;
- La dynamique d'évolution de ces caractéristiques.

La diversité des éléments est évaluée à l'aide de formule de Shannon :

$$H = -\sum_{i=1}^m p_i \ln p_i$$

où  $p_i$ , abondance relative de chaque type, est égale à  $n_i/N$  si on appelle  $n$  l'abondance du type de rang  $i$  et  $N$  le nombre total d'éléments.

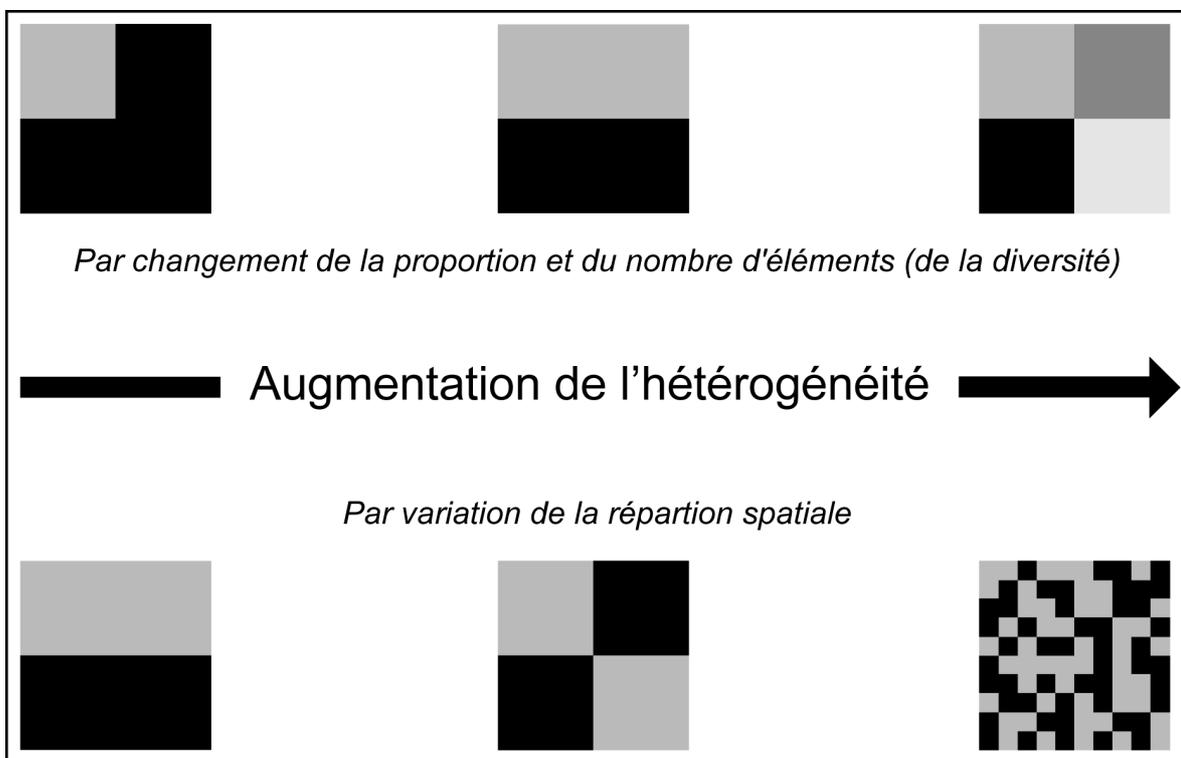


Figure 3 : Les deux composantes de l'hétérogénéité (modifiée d'après Burel et Baudry 2000)

À cette notion de diversité, on ajoute celle de spatialisation à la description du paysage. En effet, la combinaison de la mesure de la diversité et de celle du voisinage permet l'analyse de l'hétérogénéité (Forman 1995b).

En fait, la variété dit combien d'éléments sont présents, la diversité donne leur proportion respective en surface et l'hétérogénéité permet d'appréhender leurs relations spatiales (Burel et Baudry 2000). La diversité des éléments du paysage et la complexité de

leurs relations spatiales sont donc les deux composantes principales de l'hétérogénéité (figure 3)

De nombreux auteurs ont montré l'importance de l'hétérogénéité spatiale en écologie du paysage (Farina 1998 ; Forman 1995a ; Forman 1995b ; Hansson 1977 ; Odum 1971).

L'hétérogénéité spatiale du paysage a des effets importants sur la dynamique des populations animales (Duhamel *et al.* 2000 ; Kie *et al.* 2002), mais ces interactions sont complexes et variables selon l'échelle spatiale considérée (Turner 1989 ; Wiens 1989). Depuis une vingtaine d'années, les écologues ont recours à des méthodes quantitatives pour analyser et modéliser les variations spatiales des données écologiques (Liebhold et Gurevitch 2002). Les analyses fractales, spectrales et par ondelettes (Bradshaw et Spies 1992 ; Harper et MacDonald 2001 ; Keitt 2000 ; With *et al.* 1997) sont par exemple utilisées pour explorer des structures à travers plusieurs échelles.

#### 1.1.5.2 La notion d'échelle

De nombreuses publications mettent en avant l'importance des études multi-échelles dans le cadre des analyses écologiques de paysage (Jelinski et Wu 1996 ; Turner *et al.* 1989 ; Wu *et al.* 2000 ; Wu *et al.* 2002).

En effet, les structures spatiales apparentes et donc, entre autres, l'hétérogénéité, sont fonction de l'échelle de résolution (Turner et Gardner 1990). Ainsi, il est certain que l'étude d'un système à une échelle donnée peut ne pas faire apparaître des phénomènes qui apparaîtraient à d'autres échelles (Allen et Hoekstra 1992).

Outre la résolution, une variation de l'échelle peut concerner l'étendue du terrain d'étude. En effet, en changeant l'aire de l'espace étudié, on en modifie également les caractéristiques globales telles que l'hétérogénéité ou la diversité (Baudry 1992).

La notion d'échelle spatiale fait donc référence, en générale, à deux mesures fondamentales (figure 4) :

- L'étendue qui est la taille de l'espace étudié ;
- La résolution qui correspond à la taille du grain, du pixel ou de la cellule.

Mais la notion d'échelle fait également référence aux niveaux d'organisation sociale ou de processus biophysiques. Selon les typologies (Allen et Star 1982 ; O'Neill *et al.* 1986), il existe plusieurs types d'emboîtement d'échelle ou hiérarchie d'organisation des écosystèmes : la hiérarchie de l'organisation biologique, la hiérarchie des processus et la hiérarchie spatiale. Il n'existe cependant pas nécessairement une correspondance entre ces différentes formes de hiérarchie (Fotsing *et al.* 2003). Ainsi, lorsqu'on s'intéresse à l'étude de la structure et de la dynamique de l'utilisation de l'espace, on peut distinguer l'échelle de prise de décision, l'échelle d'intervention des acteurs et l'échelle d'opération des processus.

Il est donc important de conduire les analyses qui intègrent les échelles spatiales et temporelles des processus écologiques qu'elles considèrent (Liu et Taylor 2002).

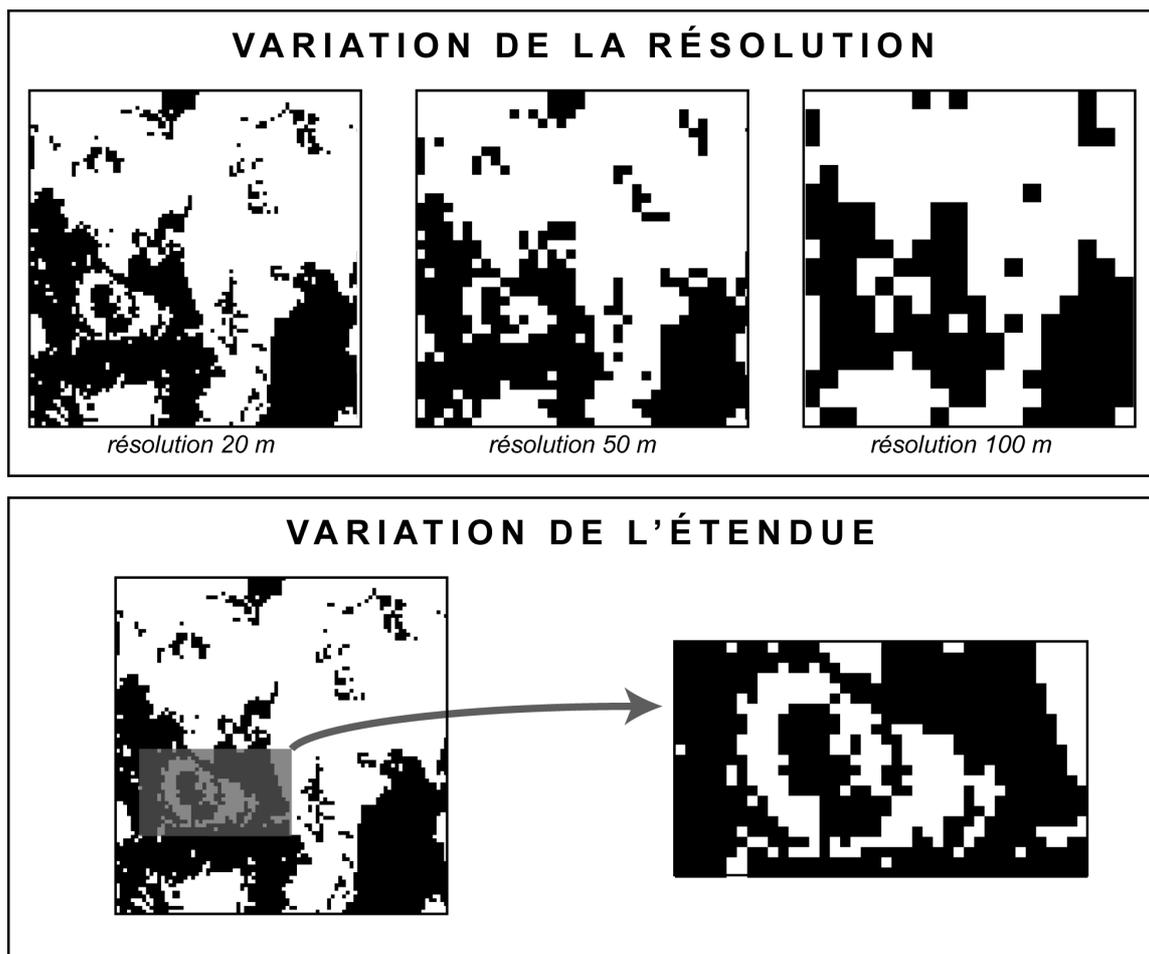


Figure 4 : Échelle : variation de l'étendue et de la résolution (modifiée d'après Burel et Baudry 2000)

Nicolas Schermann et Jacques Baudry distinguent trois niveaux emboîtés de taille d'espace pour caractériser la structure spatiale d'un paysage (Schermann et Baudry 2002) :

- Le plus petit niveau correspond à la résolution. Cette dernière peut être choisie en fonction des éléments étudiés, ou subie selon les moyens techniques disponibles, mais aussi selon la précision des données disponibles ;
- Le niveau au-dessus est l'échelle ou étendue de description locale du paysage ;
- Le niveau englobant est l'échelle ou étendue de description globale du paysage.

La notion d'échelle donc est intimement liée à la théorie de la hiérarchie (Allen et Star 1982 ; O'Neill *et al.* 1986), à travers laquelle les acquis conceptuels, tels l'écosystème ou la notion d'hétérogénéité sont reconsidérés. Cette théorie de la hiérarchie, portant sur l'organisation des systèmes avance que les structures à large échelle gouvernent généralement celles à grains plus fins, elles-mêmes souvent sujettes à une plus forte variabilité et donc plus difficiles à décrire. La préoccupation relative à la pertinence des échelles d'approche est permanente dans la littérature écologique : on assiste à un débat récurrent bâti sur une certaine opposition entre les logiques ascendantes (bottom-up) et les logiques descendantes (top-down).

Les systèmes écologiques se présentent comme une suite d'emboîtements d'unités et de phénomènes se déroulant à des échelles de plus en plus grandes. Les niveaux supérieurs contraignent la liberté des niveaux inférieurs et sont eux-mêmes la résultante de la tendance globale des niveaux inférieurs. Chaque niveau présente une certaine autonomie et des facteurs de contrôle qui lui sont propres. Il est alors judicieux d'identifier et d'étudier séparément chacun des niveaux hiérarchiques (qui sont également nommés « niveaux d'organisation »).

Il est important de noter qu'en favorisant l'échelle spatiale, nous ne considérons pas l'échelle temporelle. En effet, si certains phénomènes peuvent être décrits en fonction de diverses échelles spatiales, ils peuvent également l'être selon plusieurs échelles de temps. D'autant qu'il existe une corrélation entre les échelles d'espace et de temps, et que les

niveaux d'organisation sont caractérisés par la vitesse de fonctionnement des phénomènes (Burel et Baudry 2000).

### 1.1.6 Les interactions du milieu biotique et du milieu abiotique

Des liens étroits existent entre la végétation et la forme du terrain. Comme nous l'avons avancé, trois éléments principaux façonnent le paysage :

- Le milieu abiotique (milieu physique) ;
- Les processus biotiques (ayant trait aux végétaux et aux animaux) ;
- Les éléments influençant ces processus.

Le milieu physique a une influence primordiale dans la répartition du couvert végétal au niveau microclimatique et édaphique. Ce couvert résulte en partie du climat et de la topographie. En effet, le climat prévalant dans une région exerce un fort contrôle sur le milieu biogéographique en influençant la distribution de l'énergie et de l'eau. De plus les effets du climat sont eux-mêmes modifiés par la topographie, les caractéristiques géomorphologiques du paysage résultant des phénomènes géologiques qui induisent le relief et la formation des sols.

Le climat et les formes du terrain définissent donc le milieu physique sur lequel les sols et le milieu biotique se développent.

Le climat se manifeste essentiellement par les températures (distribuées selon les altitudes et les orientations) et l'humidité (inhérente à de nombreux paramètres dont les formes du terrain). Il est considéré comme la principale contrainte s'exerçant sur la distribution de la végétation (Stephenson 1990 ; Whittaker 1975).

Quatre effets principaux des formes du terrain sur le milieu biotique et les processus qui l'animent ont été caractérisés (Swanson *et al.* 1988) :

- Les effets sur le climat local : élévation, matériel parental et pentes ont une influence certaine sur les températures de l'air et du sol, sur l'humidité, les éléments nutritifs et autres matériaux présents au sein du paysage. Par exemple,

les versants d'exposition sud recevront plus de radiations solaires que les versants d'exposition nord, amenant plus de chaleur et moins d'humidité ;

- Les effets sur les flux écologiques : les formes du terrain influencent les flux d'énergie, de matière et le déplacement des organismes au sein du paysage ;
- Les effets sur les régimes de perturbations tels que le vent (influence sur les dommages provoqués par les tempêtes), les incendies (influence sur les causes de démarrage) ou le pâturage (le pâturage du bétail se localisant souvent en zones de pentes douces ou en zone riparienne en fond de vallée). Ces phénomènes ont une influence marquée sur le milieu végétal ;
- Les effets sur les processus géomorphologiques, le transport de matériaux organiques ou inorganiques qui altèrent les caractères et processus biotiques (glissement de terrains, sinuosité des talwegs...).

Les influences du milieu physique sont souvent intercorrélées. Par exemple, en milieu montagneux, les températures diminuent quand les précipitations augmentent, elles-mêmes augmentant avec l'altitude. Les effets sur le milieu biotique sont divers : modification de la distribution par croissance ou par mortalité...

## 1.2 Hypothèses

Cherchant à trouver des variables contribuant à l'organisation d'un paysage de moyenne montagne » et en considérant les concepts abordés auparavant, nous avons mis en place un certain nombre d'hypothèses à propos de la façon dont s'organise un paysage :

- Hypothèse 1 : un certain nombre de variables, physiques ou anthropiques, ont un effet structurant sur le paysage et il est possible de déterminer lesquelles ainsi que de quantifier cet effet ;
- Hypothèse 2 : ces variables ne jouent pas forcément un rôle de même importance en fonction de l'échelle considérée et il est possible de mettre en évidence les échelles auxquelles elles jouent un rôle primordial ;

- Hypothèse 3 : parmi toutes ces variables, celles qui s'expriment à des échelles nombreuses et variées vont avoir une influence majeure par rapport aux autres.

Afin de d'éprouver ces hypothèses, nous nous sommes fixé un certain nombre d'objectifs.

## 1.3 Objectifs

Les interactions entre phénomènes géomorphologiques, anthropiques et écologiques soumis à l'action de l'échelle et conduisant à la structuration du paysage induisent un phénomène complexe. C'est la caractérisation de ce dernier que nous nous sommes fixée comme objectif principal dans le cadre de notre travail de recherche.

Ainsi, nous cherchons à estimer comment un certain nombre de variables influencent l'organisation des paysages de moyenne montagne. Il s'agit donc de proposer une méthodologie d'analyse quantitative qui devra être applicable facilement, à moindre coût, sur le plus grand nombre de terrains d'étude.

Un tel outil trouverait son intérêt auprès de scientifiques souhaitant identifier des processus écologiques au sein d'un paysage ou d'un autre type de système spatialisé. Mais il pourrait également être utilisé par des gestionnaires désireux d'étudier un paysage afin d'optimiser leurs actions de restauration, de préservation et de sélectionner rapidement des variables souhaitables à intégrer dans leur démarche en fonction de l'échelle à laquelle ils souhaitent ou doivent travailler.

Quoi qu'il en soit, un certain nombre d'objectifs intermédiaires doivent être atteints.

### 1.3.1 L'analyse du terrain d'étude

Si l'occupation du sol peut-être obtenue par l'achat d'une base de données (telle celle du programme Corine landcover), elle peut être issue, comme dans le cadre de notre recherche, de travaux de télédétection. Un tel exercice nécessite une connaissance approfondie du terrain, permettant de disposer de données de grande qualité.

De la même façon, une bonne connaissance du terrain d'étude va permettre de mettre en évidence les variables anthropiques (agriculture, élevage, foresterie, tourisme...) dont les actions vont avoir une influence sur l'organisation du paysage. Elle va également permettre de sélectionner des variables physiques inhérentes au milieu considéré et qui au vu d'un certain nombre d'éléments, participent à la structuration du paysage. On peut penser, par exemple, à des facteurs climatiques, hydrologiques...

Si certaines de ces données peuvent être facilement acquises par un travail d'enquête (notamment les variables liées aux pratiques agricoles), il n'en va pas de même pour celles liées aux formes du terrain.

### 1.3.2 Le choix et l'acquisition des certaines variables physiques

Nous nous proposons de faire le point sur les variables secondaires dérivées des modèles numériques de terrain (telles que les pentes, les expositions, les courbures...). Plus que d'en faire un simple catalogage, nous en préciserons les fondements scientifiques.

Ces variables n'ayant pas été mises au point par différents chercheurs, les formulations mathématiques ne sont pas basées sur les mêmes notations (notamment quant à l'appellation des différentes variables). Nous procéderons à l'homogénéisation de l'écriture de ces formules.

Nous en exposerons également les influences sur les conditions physiques du milieu et donc sur la distribution de la végétation et l'organisation du paysage.

Outre cette recherche bibliographique et cette réécriture, nous étudierons également l'expression des différents algorithmes, en fonction de l'échelle considérée, par comparaison avec la réalité du terrain en sélectionnant une zone du terrain d'étude caractérisée par sa géomorphologie locale.

### 1.3.3 La mise en place d'une méthodologie

Une fois constituée une base de données S.I.G. comprenant toutes les variables choisies pour être prises en compte se pose la question de la méthodologie.

Mener à bien notre objectif principal nécessite tout d'abord de trouver une méthode d'analyse adéquate. Notre choix s'est porté, après différents tests et études bibliographiques, sur la procédure Pegase (Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique) mise au point par Michel Phipps, professeur émérite de l'université d'Ottawa (Phipps 1981 ; Phipps 2001 ; Phipps 2002). Cette procédure, déjà utilisée dans une vingtaine de recherches, est décrite dans le chapitre 5. Pegase s'appuie sur la théorie des systèmes discrets ou distribués et sur la théorie de l'information et cherche à mettre en œuvre le concept d'ordre - ou organisation - dans un paysage et à en donner une mesure. Elle permet ainsi d'estimer la contribution d'un certain nombre de variables (explicatives) à l'organisation d'un paysage, caractérisée par l'occupation du sol (variable cible).

Dans le cadre de notre travail, nous chercherons à innover quant à l'utilisation de Pegase. Deux points principaux seront ainsi explorés :

- L'intégration de Pegase dans un système d'information géographique. Pegase nécessite la construction d'une base de donnée spécifique. Cette mise en place est fastidieuse, notamment lorsque l'on souhaite y intégrer un grand nombre de variables et plus encore lorsque le nombre d'individus (de cellules) est très important. Nous nous proposons d'automatiser cette construction à partir de fichiers « raster » issus d'une base de données S.I.G.. Pour cela, nous développerons un couple d'outils (un pour l'en-tête et un pour le corps de la base de données) permettant l'importation de fichiers raster au format d'échange ASCII et la mise en place de « méta-bases de données Pegase » ;
- L'apport de la notion d'échelle. En effet, les utilisations de Pegase n'ont jusqu'à présent considéré une seule et même échelle. Il semble intéressant, pour un terrain d'étude donné, d'évaluer les résultats fournis par Pegase à des échelles différentes. En effet, ce type d'approche n'a jamais été envisagé avec cet outil. Ainsi, à partir du fichier de sortie de la procédure, nous étudierons l'évolution des résultats en fonction de l'échelle considérée et nous pourrions donc d'estimer à quelle résolution ou à quelle étendue l'utilisation de ces variables est la plus pertinente. La mise en place de séries de graphiques devrait permettre de cerner ces influences.

### 1.3.4 Envisager d'autres applications pour la méthode

Nous avons rajouté ce dernier objectif, au cours de notre familiarisation avec les concepts liés au processus Pegase, au vu des premiers résultats que nous avons obtenus. En effet, l'outil s'est avéré pouvoir potentiellement fournir une aide à la mise en place de classifications automatiques lors de travaux en télédétection. Nous évaluerons donc cette possibilité.

## Chapitre 2 : Cas d'étude : les Hautes Chaumes des Monts du Forez

### 2.1 Les Parcs Naturels Régionaux

Au début des années 70, l'État français a pris conscience des problèmes liés à l'environnement. Ce fait s'est matérialisé par la création du Ministère de l'Environnement et l'élaboration des premières lois en rapport avec la protection de la nature. Ainsi a-t-on vu la mise en place de nouvelles structures : les Parcs Naturels Régionaux (P.N.R.). Ces derniers diffèrent des Parcs Nationaux par leur fonction et leur structure. Tout d'abord, ce sont les régions qui ont l'initiative de leur création (bien que le Ministère de l'Environnement doive entériner cette dernière par décret). Pour être classé en P.N.R., un territoire doit avoir un équilibre fragile basé sur une richesse patrimoniale importante (tant au point de vue de ses écosystèmes, de ses paysages, de ses cultures et de ses traditions) sur lequel s'exerce un certain risque (Laurens 1997).

Les P.N.R. ont deux objectifs principaux :

- Conservation et valorisation des milieux et des paysages qui font l'identité et la richesse du territoire ;
- Participation au développement et/ou à la stabilité économique du territoire en mettant en place des actions de développement local qui sont en adéquation avec la notion de conservation du patrimoine naturel.

Plus généralement, on définit différentes missions principales pour les P.N.R. :

- Protéger l'environnement, le patrimoine, notamment par une gestion adaptée des milieux naturels et des paysages ;
- Contribuer à l'aménagement du territoire ;
- contribuer au développement économique, social, culturel et à la qualité de la vie ;

Mais aussi :

- Assurer l'accueil, l'éducation et l'information du public ;
- Réaliser des actions expérimentales ou exemplaires dans les domaines cités et de contribuer à des programmes de recherche.

Le mot d'ordre au sein des P.N.R. est donc de protéger en développant et de développer en protégeant (Lajarge 1997).

Ainsi, afin de mener à bien ses missions, le parc se doit de mettre en place des projets et de participer à des programmes expérimentaux et à des programmes de recherche (Laurens 1995).

Il existe à ce jour quarante-quatre P.N.R.

## 2.2 Le P.N.R. Livradois-Forez

Secteur de moyenne montagne, le Livradois-Forez s'étend à l'ouest jusqu'aux plaines de Limagne et, à l'est, les crêtes des Monts du Forez le séparent de la vallée de la Loire. Il s'étend sur deux départements : le Puy-de-Dôme et la Haute-Loire (Figure 4).

Il offre une grande diversité de milieux naturels, de l'étage subalpin des Hautes Chaumes du Forez aux secteurs de la bordure ouest des Monts du Livradois. À cette diversité de milieux correspond une grande diversité de faune et de flore.

Administrativement, le P.N.R. Livradois Forez est constitué de :

- 170 Communes ;
- 10 Communes associées ;
- 27 Structures intercommunales ;
- 321 992 hectares ;
- 109 030 habitants.

Le Parc Naturel Régional Livradois-Forez est juridiquement un Syndicat Mixte, composé de la Région Auvergne, des Départements du Puy-de-Dôme et de la Haute-Loire, des communes adhérentes.

La Charte du Parc définit pour 10 ans (1998/2008) le projet de territoire. Sa philosophie repose sur 3 principes :

- maintenir le territoire vivant ;
- miser sur la volonté, la détermination et l'imagination des hommes ;
- préserver et valoriser le patrimoine naturel et culturel.

Elle s'articule autour des missions inhérentes à tout Parc Naturel Régional.

## 2.3 Les Hautes Chaumes

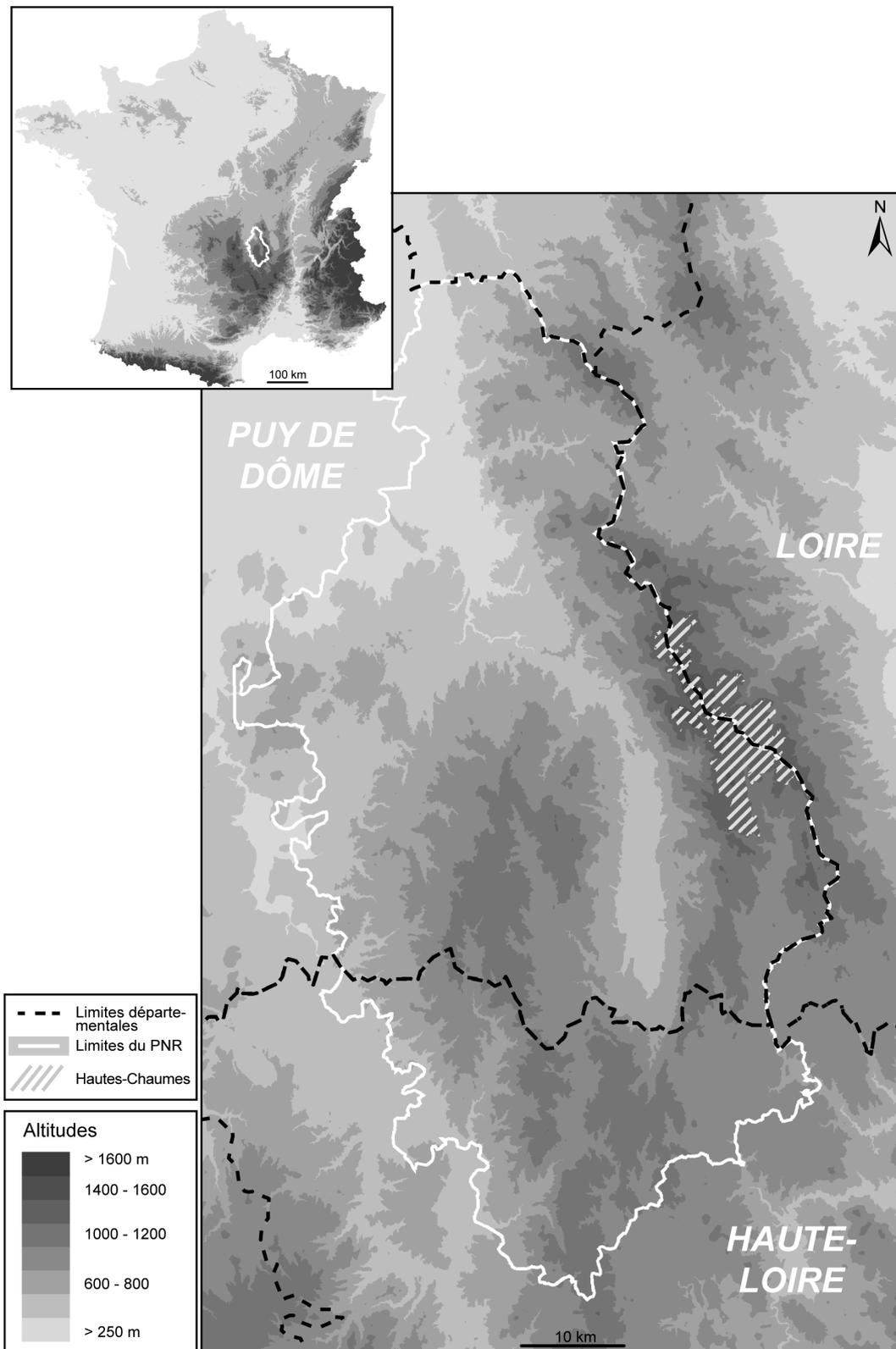
### 2.3.1 Les Monts du Forez

Moyenne montagne cristalline située dans le quart nord-est du Massif Central, les Monts du Forez sont dominés par une zone sommitale de landes ou « Hautes Chaumes » au dessus de la limite supérieure actuelle de la forêt (Thébaud 1988).

Leur ligne de crêtes s'étend sur plus de 40 kilomètres de long et culmine à 1634 mètres au lieu dit Pierre sur Haute (Baulig 1928).

À l'ouest, les Monts du Forez tombent rapidement vers Ambert et la Vallée de la Dore, tandis qu'à l'Est, ils descendent plus lentement vers la plaine du Forez (Baulig 1928).

Les Monts du Forez apparaissent ainsi comme un bon exemple du morcellement d'un massif ancien (Etlicher *et al.* 1993).



Carte 1 : Localisation du P.N.R. Livradois-Forez

La massivité des formes, tout comme la composition exclusivement de roches cristallines en font un exemple didactique de horst (Etlicher 1986).

En raison de sa position, le massif forézien est devenu un exemple particulièrement démonstratif de moyenne montagne, où, malgré une altitude modeste, l'étagement s'étale avec une rare vigueur, qu'il s'agisse de celui de la végétation, des sols, des modelés, des activités (Etlicher *et al.* 1993). À cet étagement, s'ajoute une dissymétrie accusée, renforcée par la direction méridienne du massif : un versant au caractère océanique marqué s'oppose à un versant oriental au caractère continental (Etlicher *et al.* 1993).

### 2.3.2 Approche géographique

Les Hautes Chaumes constituent donc la zone sommitale des Monts du Forez, dont la limite inférieure se situe autour de 1200 m et composent un paysage original de landes, de pelouses et de tourbières.

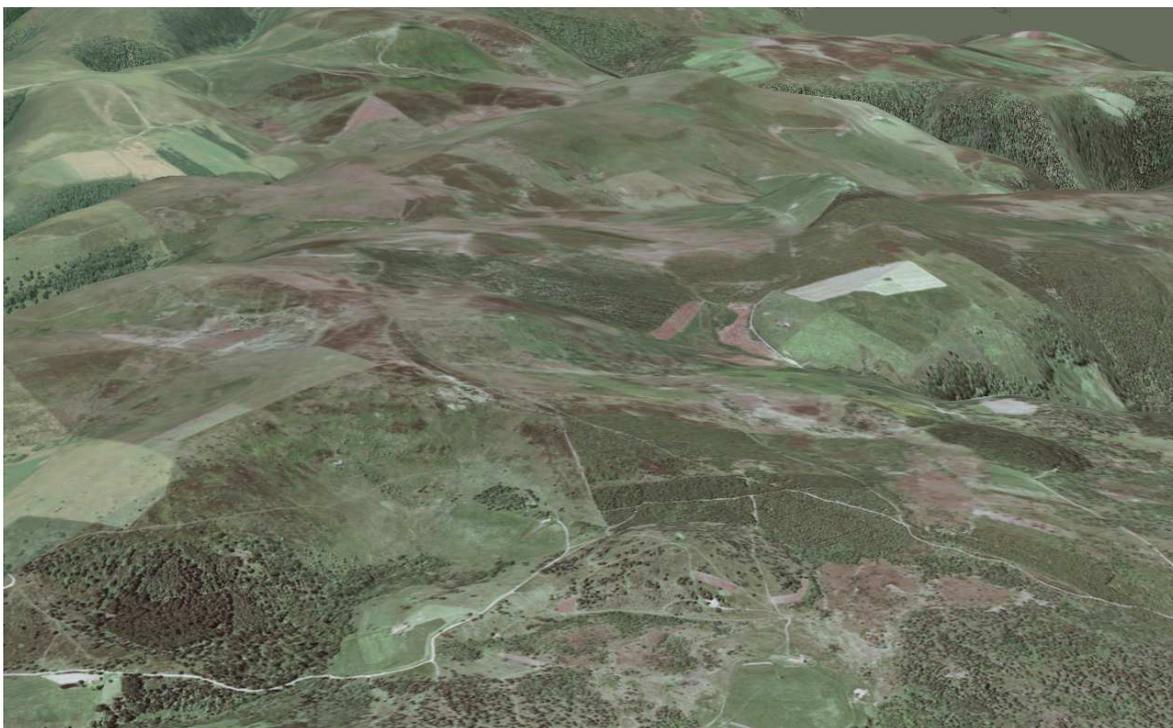


Figure 5 : Visualisation en 3 dimensions d'une partie des Hautes Chaumes (réalisée avec SpaceEyes 3D)

Ce domaine couvre environ 8500 hectares. Il s'allonge sur près de 25 kilomètres pour une largeur maximale de 9 kilomètres et minimale de 600 mètres.

Les Hautes Chaumes, essentiellement granitiques, offrent des reliefs assez contrastés, un peu marqués par les glaciations quaternaires (Etlicher 1986). Au Nord et au Sud, on observe des plateaux aux croupes molles séparés par des dépressions humides à faibles pentes. La partie centrale est au contraire caractérisée par des crêtes et des zones rocheuses aux pentes prononcées. Cette topographie est favorable à la variation de pentes et d'exposition dont l'importance est capitale à cette altitude (Etlicher *et al.* 1993).

### 2.3.3 Approche climatologique

Ces landes, localisées au-dessus de l'habitat permanent, sont exposées à un climat sous influence océanique. Les précipitations sont comprises en moyenne entre 1200 mm et 2000 mm annuels et présentent un gradient Nord-Sud.

La température moyenne annuelle est généralement inférieure à 6°C. La saison hivernale s'étale en effet de septembre à juin et l'enneigement est important (3 à 6 mois). Le relief génère cependant de nombreux microclimats très différenciés (Bessenay 1995). Les vents violents provoquent la mise en place de nombreuses congères.

La rigueur des conditions de vie est accentuée par l'altitude et la présence de sols pauvres, acides (pH entre 4 et 5) et peu évolués (rankers d'altitude).

### 2.3.4 Approche écologique

La végétation des Hautes Chaumes foréziennes, derrière son apparente monotonie, révèle une hétérogénéité majeure au niveau des communautés qui la constituent (Etlicher *et al.* 1993). Au-dessus de la limite supérieure de la forêt, naturelle ou artificielle, de nombreux groupes végétaux s'expriment en fonction de la diversité des conditions stationnelles d'une part et de l'exploitation pastorale actuelle et passée d'autre part (Thébaud 1990).

Des contraintes écologiques fortes ont donc entraîné l'expression de biotopes diversifiés et spécialisés d'une grande richesse biologique, caractéristiques de l'étage montagnard supérieur ou même ponctuellement de l'étage subalpin.

L'exploitation pastorale est avancée comme étant déterminante de la nature ligneuse ou herbacées des différentes formations végétales (Thébaud 1990) :

- des landes dominées par les abrisseaux nains : myrtille, callune, genêt poilu, représentant généralement des stades d'abandon pastoral ;
- des pelouses ou prairies témoignant d'une certaine exploitation pastorale.

Des exceptions existent cependant, et à l'intérieur de chaque grand type, des différences floristiques et structurales se manifestent. Celle-ci sont principalement dues aux facteurs du milieu (Thébaud 1990).

Trois grands types de landes sont les plus représentés :

- Au dessous de 1450-1500 m, on constate l'omniprésence de la callunaie-génistaie à myrtilles (*Calluna vulgaris*, *Cytisus scoparius*, *Vaccinium myrtillus*) où l'on rencontre d'autres espèces strictement montagnardes telles que le fenouil des Alpes (*Meum athamanticum*), le gaillet des rochers (*Galium saxatile*), la jonquille (*Narcissus pseudonarcissus*), la gentiane jaune (*Gentiana lutea*), la bistorte (*Polygonum bistorta*) (Thébaud 1990). Ce groupement est généralement très pauvre, présentant de nombreuses espèces acidophiles. Il se développe à toutes expositions dans des conditions topographiques peu contrastées (Thébaud 1990). Cette lande peut être fortement transformée par l'exploitation pastorale. On obtient alors des pelouses, prairies ou landes ouvertes, formations très différentes de la callunaie-génistaie de départ mais pouvant se rattacher phytosociologiquement à ce groupement du fait du caractère extensif de l'exploitation (Thébaud 1990) ;
- la lande à airelles des marais et alchémilles des rochers (*Vaccinium uliginosum*, *Alchemilla saxatilis*) est pauvre en espèces : aux deux espèces précédentes s'ajoute le trèfle des alpes (*Trifolium alpinum*). Elle se

différencie de la précédente par trois espèces strictement subalpines. Les trois arbrisseaux de la callunaie-génistaie à myrtilles sont toutefois bien représentés et peuvent en fonction des conditions topographiques locales se trouver dominants (Thébaud 1990). Ce groupement assez répandu dans les Hautes Chaumes supérieures apparaît comme une association en équilibre avec les conditions climatiques et topographiques générales, un « climax climatique » non arboré, caractérisant l'étage subalpin en Haut-Forez et relayant, aux plus hautes altitudes, les forêts de hêtres (Thébaud 1990) ;

- la myrtille herbeuse à bétoine est une lande caractérisée par une grande richesse en espèces et par la dominance de la myrtille qui peut former des peuplements quasi exclusifs. Elle se différencie des deux types précédents par la présence d'espèces thermophiles et d'espèces à affinités atlantiques (Thébaud 1990). Cette association est liée à un enneigement relativement long (entre 5 et 6 mois) garantissant une bonne alimentation en eau et une protection efficace contre les grandes gelées ainsi qu'une exposition favorable.

Il existe également deux grands types de pelouses et broussailles (hormis celles d'origine anthropique qui se rattachent généralement, d'un point de vue phytosociologique, à l'un des trois types de landes cités ci-dessus) (Thébaud 1990). Il s'agit des groupements naturels dominés par les herbacées mais où les arbustes et arbrisseaux existent en proportion non négligeable (Etlicher *et al.* 1993) :

- la calamagrostidaie à sorbiers constitue le représentant d'un type prairial thermophile présente dans toutes les parties supra-sylvatiques des moyennes montagnes européennes subatlantiques. Cette prairie subalpine naturelle comporte plusieurs espèces de sorbiers et possède une grande richesse en espèces de groupes écologiques divers (des thermophiles, des prairiales relativement exigeantes en matières nutritives, des mésohygrophyiles et des acidophiles (Etlicher *et al.* 1993). L'association est liée à des microclimat d'abri dans un contexte climatique général de forte humidité atmosphérique et de vents rigoureux ;

- la mégaphorbiaire à adénostyles et fougères alpestres est une formation dominée par des espèces herbacées volumineuses exigeantes en eau et en matières nutritives, et riche en fougères alpestres. Cette formation est caractérisée par une forte biomasse herbacée : elle comprend un grand nombre d'espèces eutrophiques et compte un cortège non négligeable d'orophytes à optimum subalpin. Elle occupe les ruptures de pentes humides et longuement enneigées au-dessus de 1500m, conditions dues surtout au niveau des expositions Nord-Est des cirques de névés hérités de la période glaciaire. Ces pelouses sont cependant peu représentées et restent très localisées (Etlicher *et al.* 1993).

Les fumades foréziennes constituent un type de prairies de fauche bien particulier du fait de leur localisation topographique et de leur système d'exploitation pastorale très caractéristique (D'Alverny 1907). Elles sont localisées à proximité des jasseries. Ces dernières sont des unités d'exploitation servant d'abri pour les bêtes, leurs gardiens et les réserves de nourriture. Ils s'agit également d'ateliers de fabrication de la fourme avec leur cave d'affinage et son entrepôt à fromage. Ces jasseries sont les sources de l'engrais pour la fertilisation des fumades (Damon 1972). En effet, les fumades reçoivent, pendant la durée de l'estive, les excréments du troupeau et les eaux de lavage de l'étable et, régulièrement fertilisées et fauchées, elles font l'objet d'améliorations tant que la jasserie est fréquentée (Etlicher *et al.* 1993). Même après plusieurs années d'abandon, les fumades restent fortement individualisées : la production y est supérieure et elles forment une unité phytosociologique et floristique au sein de l'ensemble des prairies des montagnes Ouest-Européenne (Thébaud 1990).

Enfin, les Hautes Chaumes possèdent des milieux humides surtout représentés par les tourbières acides, les températures basses et la forte humidité favorisant le développement et l'extension des sphaignes.

Parmi ces milieux, une très forte proportion relève d'habitats d'intérêt communautaire imbriqués de manière complexe. Seize habitats ont été identifiés : landes et pelouses sèches, prairies de fauches de montagne, formations à hautes herbes, plusieurs types d'habitats tourbeux, des hêtraies et des sapinières à forte naturalité et enfin des

milieux rocheux (Jacqueminet *et al.* 2002). Ces milieux constituent autant de foyers de vie pour des espèces d'intérêt communautaire :

- 3 bryophytes : Buxbaumie verte (*Buxbaumia viridis*), Bruchie des Vosges (*Bruchia vogesiaca*), et *Hamatocaulis vernicosus* ;
- 2 lépidoptères : Damier de la Succise (*Euphydryas aurinia*) et Apollon du Forez (*Parnassius apollo francisci*) ;
- 1 amphibien : Crapaud des joncs (*Bufo calamita*) ;
- 4 chiroptères : Barbastelle (*Barbastella barbastellus*), Murin de Bechstein (*Myotis bechsteini*), Petit Murin (*Myotis blythii*) et Grand Murin (*Myotis myotis*).

Mais les Hautes Chaumes constituent par ailleurs un sanctuaire pour de nombreuses autres espèces rares ou menacées d'oiseaux, de papillons ou de plantes.

### 2.3.5 Une action anthropique marquée

La présence de milieux ouverts d'intérêt européen correspond à la partie subalpine de l'étagement mais également à un défrichement de la hêtraie-sapinière sommitale par l'homme à l'époque romaine (Janssen 1990) et même avant puisque les indices polliniques d'anthropisation ont été datés à 5000 avant Jésus-Christ (sur le site de Braveix) (Cubizolle 2005). L'activité pastorale a permis d'une part de conserver les pelouses et les landes sèches gagnées sur la forêt et d'autre part d'accentuer le contraste entre les prairies régulièrement fumées et les secteurs de landes pâturées.

Traditionnellement dévolues aux activités pastorales d'estive, les Hautes Chaumes, depuis les années 50, sont désormais vouées à de nouvelles pratiques agricoles en rupture complète avec les modèles traditionnels (Couhert 1988). En effet, ce secteur a subi une déprise agricole qui se traduit par un abandon progressif ou une surexploitation des parcelles pâturées, un regain des espèces de landes et une extension des surfaces forestières par reconquête naturelle ou reboisement volontaire.

Cette sous-utilisation pastorale a déclenché une dynamique naturelle permettant à la forêt de « grignoter » les landes, ce qui risque à moyen et long terme de faire disparaître ces milieux ouverts (Jacqueminet *et al.* 2002).

Par ailleurs, les Hautes Chaumes constituent une zone touristique très attractive et donc très fréquentée, malgré son éloignement des grands centres urbains, en raison de sa diversité paysagère issue des pratiques pastorales anciennes (Etlicher 1986) et de sa variété et de sa richesse patrimoniale (Thébaud 1988).

Cette pression anthropique conduit à une banalisation biologique et paysagère des biotopes. Cette évolution s'exprime par la diminution de la qualité pastorale des estives induisant la fermeture des paysages, les terres non pâturées étant recolonisées par les ligneux. À l'heure actuelle, les milieux ouverts ne représentent plus que 63% du site.

Il en découle une préoccupation des gestionnaires, à la fois pour le maintien des activités et des populations et le développement touristique.



## **Chapitre 3 : Variables et données pour analyser les structures paysagères**

L'étude du paysage des Hautes Chaumes nécessite la sélection et l'acquisition d'un certain nombre de données susceptibles d'agir sur son organisation.

### **3.1 Variables et paysage**

Les Hautes Chaumes constituent un territoire soumis à des contraintes susceptibles de contribuer à l'organisation de son paysage. Nous avons donc sélectionné un certain nombre de ces facteurs en fonction de leur influence potentielle sur la distribution de la végétation et, par extension, sur la structuration du paysage. Leurs prises en compte reposent sur des hypothèses posées quant au fonctionnement des Hautes Chaumes.

Ces facteurs se divisent en deux pôles principaux : les variables physiques et les variables anthropiques.

Cependant, il est important de signaler que les Hautes Chaumes forme un paysage construit, façonné par l'activité pastorale. La majorité des variables physiques sélectionnées ont une influence démontrée sur la végétation naturelle. Il est donc intéressant d'observer leur action sur un territoire fortement anthropisé.

#### **3.1.1 Les variables physiques**

##### **3.1.1.1 Les facteurs topographiques**

La topographie influence la migration et l'accumulation des substances déplacées par gravité le long de la surface de terrain et dans le sol. Elle influence également les caractéristiques microclimatiques et hydrologiques, la formation du sol et les propriétés de la couverture de végétation.

La topographie est un indicateur des structures géologiques qui peuvent commander les dépôts de sédiments et ainsi affecter des caractéristiques de sol et des végétaux (Florinsky *et al.* 2002).

#### 3.1.1.1.1 L'altitude

Sur les Hautes Chaumes, l'étagement altitudinal est très caractéristique. Il s'agit donc d'un facteur important à considérer. Il a une action directe sur le climat, sur l'énergie solaire reçue et sur la distribution de la végétation (Moore *et al.* 1991).

#### 3.1.1.1.2 La pente

Les Hautes Chaumes sont constituées de plateaux parcourus de vallées encaissées. Les pentes doivent y jouer un rôle fondamental dans la distribution de la végétation. Elles influencent notamment la vitesse des eaux de surface et souterraines, les eaux de ruissellement, les précipitations locales, la teneur en eau des sols et les processus géomorphologiques tels que ceux liés à l'instabilité des sols (glissement de terrain...) (Moore *et al.* 1991). Elles conditionnent également l'ensoleillement et le rayonnement reçu par le terrain considéré. Elles constituent par ailleurs un élément clef de l'occupation humaine des paysages, par l'influence qu'elles exercent à la fois sur les sites d'habitat, sur le dessin du parcellaire, sur la capacité de mise en valeur agricole et forestière, en fonction notamment de la mécanisation.

#### 3.1.1.1.3 L'exposition

L'orientation des pentes est un autre facteur que nous avons choisi de prendre en compte. Elle a une action sur l'insolation et l'évapotranspiration, sur la distribution et l'abondance des espèces végétales et animales, ainsi que sur le climat local (Moore *et al.* 1991).

#### 3.1.1.1.4 Les courbures du relief

Il est possible d'estimer différents types de courbures du relief qui correspondent à la concavité ou à la convexité de la surface du terrain d'étude selon différents plans. Nous reviendrons par la suite (chapitre 3.2.2) sur les concepts mathématiques qui leur sont liés. Mais elles reflètent également la dynamique de surface liée aux processus morphologiques.

Les courbures verticale et horizontale sont les facteurs locaux de détermination de la dynamique de l'eau extra et intra-sol.

La première influence la distribution de couverture végétale. Elle affecte l'humidité des sols, leurs pH, l'épaisseur de leurs horizons, leur teneur en matière organique. Elle conditionne l'accélération des écoulements, le rapport entre érosion et dépôts ainsi que les processus géomorphologiques (Moore *et al.* 1991). Elle est, en outre, un indicateur des linéaments géologiques, accidents d'importance régionale (par exemple les failles), souvent à jeu complexe, qui se poursuivent sur de longues distances.

La courbure horizontale, quant à elle, entre dans les processus de convergence et de divergence des écoulements. Elle influence la teneur en eau des sols ainsi que leurs caractéristiques (Moore *et al.* 1991).

La courbure verticale maximale décrit les lignes de crêtes et la courbure verticale minimale décrit les formes de vallées.

La courbure moyenne présente la convergence de flux et le ralentissement relatif de ces derniers. La courbure moyenne peut être un attribut topographique plus représentatif que les courbures horizontale et verticale quant à la description de processus paysagers (Florinsky 2000). Elle contrôle, elle aussi, l'humidité de sol et la distribution de couverture végétale.

Les courbures d'accumulation fournissent des données sur les zones d'accumulation, de transit et de dissipation qui peuvent être employées pour prévoir quelques propriétés des sols (Florinsky 2000).

#### 3.1.1.1.5 La distance par rapport aux crêtes

Les Hautes Chaumes sont balayées par des vents violents. Cette distance est supposée induire un effet de protection face aux phénomènes climatiques locaux. En effet, crête signifie vent mais aussi sécheresse relative des sols. Les zones de crêtes sont en effet celles où la surface drainée est minimale. Ce critère peut être assimilé à la longueur de pente, significative quant au taux d'érosion, à la production de sédiments et au temps de concentration (Speight 1974).

#### 3.1.1.1.6 La distance par rapport aux talwegs

L'organisation du réseau de talwegs est fondamentale dans le fonctionnement du système d'érosion. Cette variable permet de pallier l'absence de cours d'eau non référencés dans les données hydrographiques utilisées par ailleurs. Inversement, elle permet de mettre en évidence les talwegs qui ne sont pas marqués par la présence régulière d'eau, voire même ceux qui sont totalement secs.

De fait, les sols des talwegs présentent en général une différence avec ceux des points hauts. La distance influence également le climat local par le biais de l'insolation avec un effet d'ombrage plus ou moins important. Elle va également jouer un rôle sur la circulation des vents en induisant un effet protecteur ou, au contraire, en facilitant leur flux, et ce en fonction de leur orientation.

#### 3.1.1.1.7 La rugosité du relief et le relief local relatif

L'influence de la rugosité et du relief local relatif sont essentiellement d'ordre climatique, une forte rugosité freinant les vents et diminuant, par exemple, la dissipation des brouillards. Cependant, il est important d'ajouter que ces deux indices sont fortement dépendant de l'échelle à laquelle ils sont calculés.

### 3.1.1.2 Les facteurs hydrologiques

La disponibilité en eau est un élément qui semble déterminant sur les Hautes Chaumes. Si les différents facteurs présentés ci-dessus intègrent à divers degrés la notion de disponibilité en eau, nous avons jugé utile d'en considérer d'autres.

#### 3.1.1.2.1 L'indice d'humidité ou topographique

Il s'agit d'un rapport entre bassin versant et pente (Beven et Kirkby 1979 ; Moore *et al.* 1991). Il reflète les processus d'accumulation, l'humidité des sols, la distribution des zones de saturation, la profondeur des nappes d'eau, l'évapotranspiration, l'épaisseur d'horizon des sols, la matière organique, le pH, la vase et le contenu de sable et, enfin, la distribution du couvert végétal.

#### 3.1.1.2.2 La distance au réseau hydrographique

Cette distance correspond à la distance par rapport au cours d'eau permanent le plus proche. Elle est donc complémentaire de la cartographie des distances aux talwegs (incluant des cours d'eau potentiels).

#### 3.1.1.2.3 La distance aux zones humides et la distance aux tourbières

Il existe un certain nombre de zones humides et de tourbières sur les Hautes Chaumes, qui représentent autant de zones où l'eau est disponible.

#### 3.1.1.3 Les facteurs climatiques

La topographie peut avoir un impact important sur la distribution de la quantité d'énergie solaire reçue en un point donné de la surface de la planète. Les variations d'altitude, de pente, d'exposition et de topographie locale peuvent amener à des différences substantielles quant à la radiation solaire reçue et, de ce fait, influencer des processus biophysiques liés à la température de l'air ou des sols, à l'évapotranspiration et à la production primaire. Ces processus influencent la distribution et l'abondance des espèces végétales et animales (Moore *et al.* 1991 ; Wilson et Gallant 2000). De nombreuses études ont d'ailleurs montré que la végétation était fortement influencée par la distribution des radiations solaires (Dymond et Johnson 2002 ; Reuter *et al.* 2005).

L'intégration de la quantité de d'énergie solaire et de la durée d'insolation nous a semblé intéressante.

#### 3.1.1.4 Les facteurs géologiques

D'un point de vue géologique, la roche mère est essentiellement représentée par des roches cristallines, granitiques. Ces dernières peuvent intervenir à deux niveaux :

- La composition chimique des granites qui est plutôt constante sur les Hautes Chaumes ;
- Les différences entre versants amont / aval qui sont indirectement incorporées dans les variables déjà sélectionnées.

Nous avons donc écarté la prise en compte de la carte géologique.

Il en va de même pour la distribution des sols qui, au niveau des Hautes Chaumes, reste assez homogène et est dominé par des sols crypto-podzolique.

En revanche, nous avons intégré les formations superficielles. En effet, leur prise en compte nous a paru être importante puisque qu'elles sont le support du sol et de la végétation.

Soulignons que ces ces trois premiers groupes sont fortement interrelationnels.

Parmi tous les facteurs physiques sélectionnés, il est indéniable que certains sont redondants, car fortement influencés, liés les uns aux autres.

### 3.1.2 Les variables anthropiques

#### 3.1.2.1 La distances aux chemins

Les Hautes Chaumes subissent une pression touristique importante induisant de nombreuses activités de loisirs telles que les randonnées équestres ou pédestres. Si ces activités sont peu dommageables pour le milieu, les loisirs motorisés ont fortement dégradé le réseau de chemins (ou réseau viaire) existant et créé de nombreuses pistes sauvages, détruisant la flore et favorisant l'érosion.

La distance au réseau viaire permet d'estimer l'accessibilité aux différentes zones du terrain d'étude, que ce soit pour une utilisation agro-pastorale ou pour la fréquentation touristique :

- D'un point de vue agro-pastoral, cette distance met en relief l'accessibilité des parcelles aux troupeaux et aux engins agricoles ;
- D'un point de vue touristique, elle traduit l'influence de ce type de fréquentation.

### 3.1.2.2 L'activité pastorale

L'activité pastorale existait dès l'époque romaine. Par son ancienneté séculaire et son intensité, le pastoralisme a fortement marqué le paysage, générant le recul de la forêt, la construction des jasseries et de nombreux ouvrages hydrauliques, l'apparition des fumades (Etlicher *et al.* 1993). Ces dernières correspondent aux prairies, en aval des jasseries, fertilisées par les eaux de lavages de de l'étable.

Depuis quelques décennies, avec le recul de cette activité, d'autres modes d'exploitation et de nouvelles activités sont susceptibles de mettre en péril l'intégrité du site. De nombreuses zones des Hautes Chaumes sont abandonnées.

La végétation est donc en pleine évolution. La lande et la forêt recolonisent les parcours et les fumades (Etlicher *et al.* 1993). Le domaine pastoral a fortement diminué depuis le début du siècle, perdant 2000 hectares qui sont aujourd'hui couverts par la forêt. La part inutilisée est elle aussi en augmentation et recouverte par les callunes, les myrtilles, les sorbiers ou les bouleaux.

Quant à la part utilisée, la généralisation de pratiques trop extensives compromet la valeur pastorale des Hautes Chaumes et entraîne un appauvrissement floristique, favorisant la nardaie et la callunaie (Etlicher *et al.* 1993).

L'utilisation pastorale des parcelles est donc un élément fondamental en matière d'organisation paysagère. Une part de l'espace est sous-utilisée, voire abandonnée, alors que ponctuellement la surexploitation affecte certaines parcelles. Le statut des landes, privé, communal ou sectional, complique encore le dispositif.

Nous avons donc choisi d'intégrer quatre variables liées à ces pratiques agricoles :

- L'exploitation des surfaces, en distinguant les terrains non utilisés ou boisés, les terrains pâturés et les terrains fauchés ;
- La fréquentation animale, ovine, bovine, mixte ou nulle ;
- L'utilisation des terrains de manière individuelle ou collective par des SICA, coopératives ou groupements. Cette dernière catégorie détermine

souvent par ailleurs une utilisation néfaste au milieu naturel (Etlicher *et al.* 1993) ;

- Le parcellaire, en distinguant les terrains privés de ceux collectifs.

## 3.2 Acquisition et présentation des données sélectionnées

### 3.2.1 Les outils

Plusieurs logiciels ont été utilisés en fonction de la tâche effectuée :

#### 3.2.1.1 Mise en forme des données

La mise en forme des données a été réalisée par le biais du logiciel S.I.G. ArcGis 9.x (société ESRI) associé à l'extension Spatial Analyst nécessaire pour travailler au format grid-raster. Nous y ajouterons ArcInfo Workstation qui nous apportera la puissance de calcul nécessaire à certains traitements.

#### 3.2.1.2 Calcul des indices topographiques

##### 3.2.1.2.1 Le logiciel Landserf

Landserf 2.2 (Wood 2004) est basé sur les travaux de thèse de Jo Wood (Wood 1996). Il permet l'extraction des différents indices topographiques ainsi que la modélisation des grands traits géomorphologiques à partir d'un modèle numérique de terrain.

##### 3.2.1.2.2 Le logiciel S.I.G. SAGA

SAGA 1.2 (Conrad 2004) intègre de nombreuses fonctionnalités permettant une analyse de terrain et reprenant celles déjà présentes dans le logiciel DiGeM 2.0 (Conrad 2002).

### 3.2.1.2.3 Le logiciel S.I.G. libre GRASS

Le logiciel GRASS 6.0.x (Geographic Resources Analysis Support System) a été développé au sein de l'armée américaine par l'USACERL (United States Army Construction Engineering Research Laboratory) dans l'Illinois. Il a été conçu pour réaliser des études environnementales et aider à la résolution des problèmes liés à l'aménagement du territoire. C'est donc un outil orienté à l'origine vers le traitement d'images (satellites notamment). Depuis 1995 (version 4.1), l'armée a arrêté le financement de son développement. Néanmoins, le projet a été repris en 1997 par un autre laboratoire : le Center for Advanced Geography and Spatial Research at Baylor University (Waco, USA). Depuis il est devenu un logiciel libre distribué sous la licence GNU GPL (General Public Licence). En d'autres termes le code source est accessible à ceux qui le désirent et ils ont le droit de le modifier à souhait. Plusieurs programmeurs de différents pays contribuent de façon bénévole à l'enrichissement de GRASS.

### 3.2.1.3 La construction des bases de données

Les bases de données utilisées pour les traitements possèdent une structure inhérente à l'outil analyse que nous avons choisi d'utiliser : Pegase (nous décrivons le fonctionnement de l'outil dans le chapitre 5). Nous avons pour cela développé deux outils qui facilitent l'intégration des fichiers raster au format d'échange Ascii et automatisent la mise en place de la base de données : Acs2Peg (Mazagol et Mayoud 2005) et XLPeg (Mazagol 2005). Nous reviendrons plus en détail sur le fonctionnement de ces deux outils au chapitre 5.2.2.

### 3.2.1.4 Les environnements logiciels

Les logiciels ArcView, ArcGis, Idrisi, Landserf et SAGA ont été utilisés sous environnement Windows (Windows XP), contrairement au logiciel GRASS dont l'utilisation s'est faite sous environnement Linux (Kubuntu 6.04). Le logiciel Landserf a, quant à lui, été utilisé sous les deux systèmes d'exploitation et nécessite l'installation du Java Runtime Environment 1.4 ou plus dans les deux cas.

### 3.2.2 Les données utilisées

Les cartographies présentées correspondent à notre terrain d'étude : les Hautes Chaumes des Monts du Forez.

#### 3.2.2.1 Une variable cible : la végétation

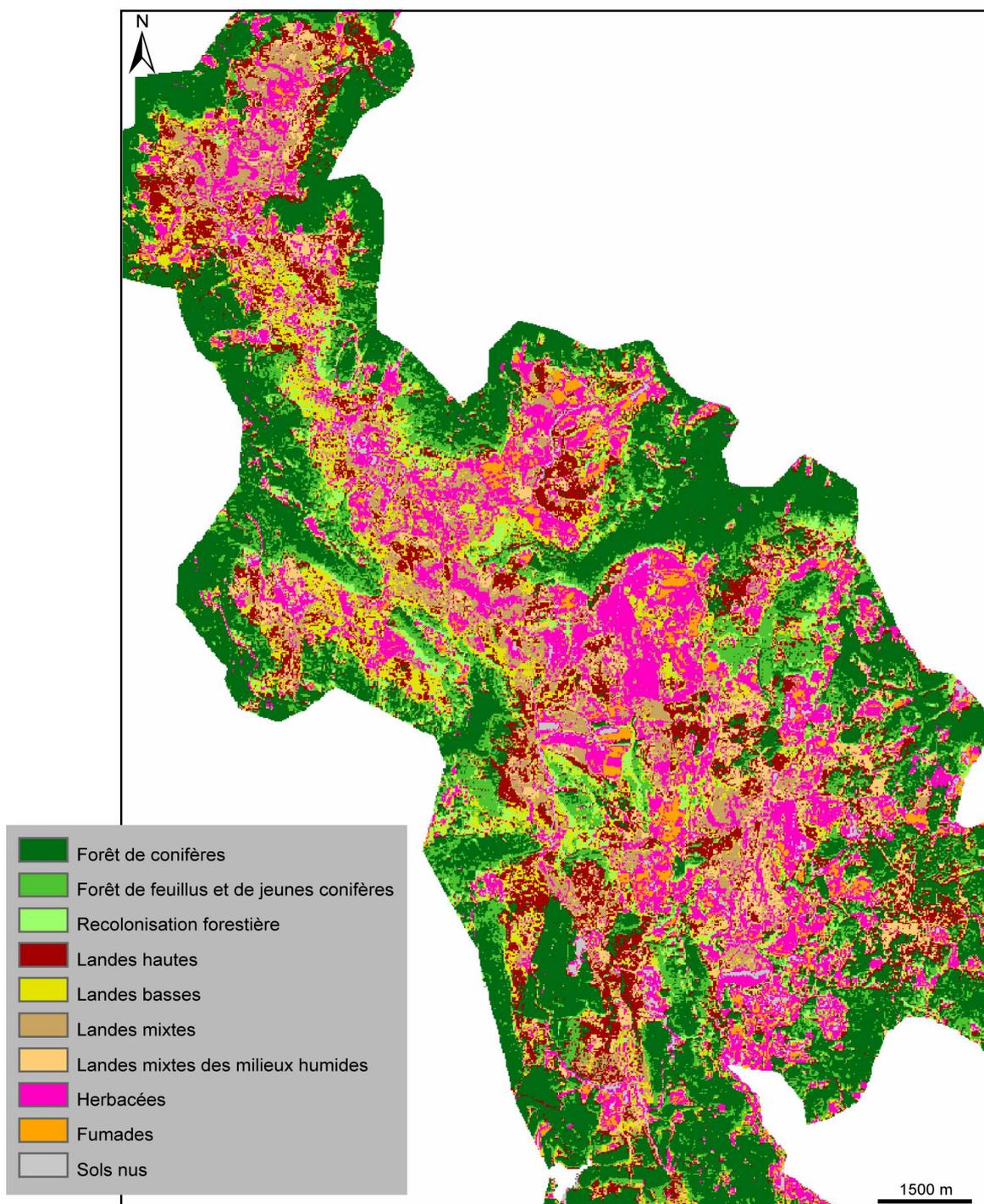
Cette variable est issue de la cartographie des formations végétales des Hautes Chaumes à l'aide des images SPOT 4 de septembre 97 et juillet 98 (carte 2) (Jacqueminet et Thébaud 2000).

Trois grands types de formations végétales sont distingués : les formations forestières composées de ligneux hauts, les landes dominées par les chaméphytes et les formations herbacées (Thébaud 1988).

Les peuplements de conifères et de feuillus sont identifiés au stade de peuplement dense et au stade de recolonisation. Les feuillus (hêtraies) et les jeunes plantations de conifères sont associées dans la même classe. Ces dernières n'ont pu être distinguées des peuplements denses de feuillus en raison d'un faible taux de recouvrement des arbres et de la présence d'un sous-bois très dense, composé de myrtilles, dont la réponse est proche de celle des feuillus (Jacqueminet *et al.* 2002).

Deux classes traduisent la recolonisation des ligneux : la « recolonisation forestière » qui correspond aux manteaux à sorbiers denses et à la lisière forestière, tout en restant relativement mixte, et les « Landes hautes ». Ces dernières se composent de callunaies denses associées à de jeunes arbres diffus (sorbiers, pins sylvestre, bouleaux...) (Jacqueminet *et al.* 2002).

Les formations de landes distinguées traduisent trois stades physiologiques de la lande : les landes hautes, les landes basses (ligneux bas : callune, myrtille) et les landes mixtes (ligneux bas et herbacées). La présence de landes traduit un état avancé d'abandon des activités pastorales. Le moindre pâturage, et notamment l'arrêt de la pratique de la fauche, favorisent la propagation des chaméphytes (Thébaud 1988). Le taxon « Landes mixtes des milieux humides » permet de percevoir les aires de tourbières.



Carte 2 : Cartographie de la distribution des types de végétation des Hautes Chaumes (Jacqueminet et Thébaud 2000)

Les formations herbacées correspondent aux pelouses dominées par des graminées (*Festuca rubra*, *Agrostis capillaris*) témoignant d'une forte pression pastorale (Thébaud 1988). On peut identifier :

- Les « Pelouses peu pâturées et les fumades » (prairies fumées) qui présentent une forte biomasse chlorophyllienne ;
- Les « Prairies de fauche » où la couverture herbacée est haute en juillet 1998 et rase en septembre 1997 ;
- Les « Pelouses rases ou sèches » qui se distinguent par une moindre activité chlorophyllienne. Elles correspondent à des prairies fauchées aux deux dates ou à des parcelles intensément pâturées partiellement envahies par le nard (*Nardus stricta*).

Les fumades constituent un type de prairies de fauche étroitement liées aux jasseries recevant, pendant la durée de l'estive, les excréments du troupeau et les eaux de lavage de l'étable et, régulièrement fertilisées et fauchées. Ainsi, plus qu'un taxon végétal particulier, il s'agit d'un usage spécifique d'une partie des parcelles herbacées.

Il est important, à ce stade, de signaler que la classification utilisée est une classification physionomique et non phytosociologique.

### 3.2.2.2 Quarante-neuf variables explicatives

Ces variables, selon leur origine, peuvent être classées en trois grands groupes :

- Les données issues du Modèle Numérique de Terrain (de chaque terrain d'étude) mis en place par l'Institut Géographique National (IGN) et ses différentes dérivées, selon une résolution 50 m ;
- Les données liées à l'utilisation du sol issues, pour les Hautes Chaumes, du travail de Carole Bessenay (Bessenay 1995) ;
- D'autres types de données dont nous détaillerons l'origine dans le texte.

#### 3.2.2.2.1 Le Modèle Numérique de Terrain et ses dérivées :

Dans le cadre de l'étude de l'influence des variables topographiques sur l'organisation d'un paysage, l'acquisition de données relatives aux propriétés géomorphologiques du terrain d'étude est une étape primordiale. Mais cette dernière est un travail de longue haleine, surtout lorsque le terrain d'étude s'étend sur une grande superficie.

Il convient donc de trouver des méthodes permettant de les acquérir de manière à la fois fiable et rapide.

##### a. Le Modèle Numérique de Terrain

###### ■ Qu'est ce qu'un M.N.T. ?

Le M.N.T. est une représentation numérique du terrain en terme d'altitude. Il fournit des renseignements sur la forme et la position de la surface topographique pour une zone géographique donnée. Il est donc défini selon un système d'altitude et un système cartographique spécifiques, et permet ensuite de construire un modèle conceptuel riche employé dans de nombreuses applications analysant les processus liés à la surface topographique (Charleux-Demargne 2001).

Le M.N.T. consiste en un échantillon de données spatiales qui donne une représentation partielle du terrain réel : la représentation des valeurs de l'altitude par un M.N.T. est effectuée de manière discontinue. Or le relief est un phénomène géographique quantitatif spatialement continu (il présente des valeurs distinctes en chaque point de l'espace). L'altitude d'un point quelconque sera alors calculée par interpolation ou extrapolation à partir des altitudes connues des points voisins. Les altitudes sont donc dites redistribuées (Laurini et Milleret-Raffort 1993).

Par ailleurs, selon la technique de construction du M.N.T., celui-ci représentera uniquement le sol nu, ou bien le sol ainsi que de tous les objets au-dessus du sol (bâtiments, végétation...) que l'on appellera « sursol » : dans ce cas, l'altitude renseignée par le M.N.T. est celle du toit de l'ensemble des objets de la surface topographique. Pour différencier les modèles suivant l'information fournie, différents termes peuvent être

attribués aux modèles numériques obtenus ou disponibles, termes pouvant prêter à confusion. Certains auteurs emploient le terme Modèle Numérique de Terrain : M.N.T. (en anglais Digital Terrain Model : D.T.M.), lorsque le modèle informe sur les altitudes de la surface topographique sans les éléments du sursol, qu'ils différencient du terme Modèle Numérique de Surface (M.N.S.) lorsque le sursol est pris en compte dans l'information altimétrique. Pour notifier que le modèle est utilisé pour sa seule information altimétrique, les termes de Modèle Numérique d'Élévation : M.N.E. (par anglicisme) ou encore Modèle Numérique d'Altitude : M.N.A. (en anglais Digital elevation Model : D.E.M.) sont également employés.

Pour notre part, nous conserverons le seul terme générique de MNT en spécifiant si nécessaire quelle est l'information altimétrique fournie par le modèle.

- Qu'apporte le MNT dans le cadre de notre recherche ?

Dans notre recherche de nouvelles données contribuant à la structuration du paysage, l'utilisation du MNT de la zone d'étude semble être une issue acceptable. En effet, nombre d'algorithmes ont été développés, de plus en plus fiables, permettant de mettre en place des cartographies des pentes, des expositions, des courbures... mais aussi des estimations de l'indice de radiation solaire, de l'indice d'humidité, de l'érosion... Ces algorithmes ont été développés tant pour leur intérêt en morphométrie qu'en hydrologie (notamment dans le cadre d'études de bassins versants).

L'observation et la quantification des formes et de l'organisation des reliefs sont à la base de l'approche géomorphologique. Au-delà de la mesure des paramètres géométriques de base que sont l'altitude, la pente ou la courbure de la topographie, les géomorphologues ont développé de nombreux descripteurs du relief.

Deux grands types de paramètres peuvent être distingués : les paramètres bi-dimensionnels, quantifiant l'organisation planimétrique du relief et ceux tri-dimensionnels, pour lesquels les variations d'altitude sont prises en compte. Au sein de chacun de ces deux types de paramètres, il est intéressant de distinguer des autres les descripteurs morphologiques qui respectent l'organisation liée aux écoulements d'eau sur la surface terrestre. En effet, si la quantification des formes du relief a pour but la compréhension des processus physiques qui les façonnent, il est logique de décrire la topographie en suivant la

structuration et l'organisation liée à l'action de ces processus. Elle peut être définie simplement à partir de n'importe quel Modèle Numérique de Terrain, en particulier si les écoulements sont strictement convergents ou parallèles, ce qui sera toujours le cas dans les zones de forte érosion sur lesquelles nous avons travaillé. Cette définition n'est pas valide dans les zones convexes de type crêtes de versants ou cônes de dépôts (Charleux-Demargne 2001).

La modélisation de terrain est donc un ensemble de méthodes quantitatives destiné à l'analyse et à la modélisation de la surface du terrain mais aussi à cerner les rapports entre la topographie et les composants géologiques, hydrologiques, biologiques et anthropogènes du paysage.

Une partie de nos données a donc été obtenue par la sélection et l'utilisation de ces algorithmes à partir d'un MNT de résolution 50m, rééchantillonné à diverses résolutions (de 20 à 100 m).

b. Les variables issues du MNT.

James Speight, dès 1974, a décrit une vingtaine d'indicateurs descriptifs du relief et calculables directement à partir d'un MNT (Speight 1974). Ces différents indicateurs permettent, par leurs combinaisons, de rendre compte de la variabilité spatiale de certains processus spécifiques.

Les paramètres de terrain qui peuvent être définis pour n'importe quelle surface continue bidimensionnelle sont au nombre de cinq (Evans 1979) : ce sont l'altitude, la pente, l'exposition, la courbure verticale et la courbure horizontale.

Nous rapporterons ci-dessous les travaux de Wood, Florinsky et Shary (Florinsky 1998 ; Florinsky 2000 ; Florinsky et Kuryakova 1996 ; Florinsky *et al.* 2002 ; Shary 1995 ; Wood 1996) relatifs à l'évaluation des paramètres morphologiques du terrain.

Ces paramètres correspondent aux groupes de différentiels d'ordre zéro, de premier ordre et de second ordre d'une équation évaluant la surface du terrain étudié.

Si des dérivées d'ordre supérieur peuvent également être extraites, il n'est pas certain qu'elles aient une signification géomorphologique (Evans 1979).

Evans (Evans 1979) évalue la surface en utilisant une fonction  $z = f(x, y)$  quadratique bivariable de forme :

$$z = \frac{rx^2}{2} + \frac{ty^2}{2} + sxy + px + qy + u \quad (\text{Équation 1})$$

Ce polynôme est obtenu par la méthode des moindres carrés pour une sous matrice de taille 3 de la matrice des altitudes avec une taille de cellule égale à  $w$  (Florinsky 1998) :

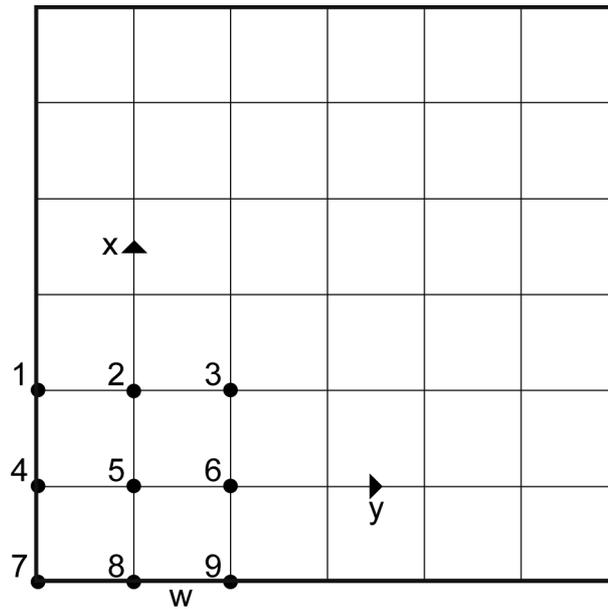


Figure 6 : Sous matrice de taille 3 de la matrice des altitudes (Wood 1996)

Les coordonnées des points de la sous matrice  $(-w, w, z_1)$ ,  $(0, w, z_2)$ ,  $(w, w, z_3)$ ,  $(-w, 0, z_4)$ ,  $(0, 0, z_5)$ ,  $(w, 0, z_6)$ ,  $(-w, -w, z_7)$ ,  $(0, -w, z_8)$  et  $(w, -w, z_9)$  sont donnés par leurs coordonnées dans le plan cartésien  $xy$  et par l'altitude  $z$  (figure 6). Il est possible d'estimer les valeurs de  $r$ ,  $t$ ,  $s$ ,  $p$  et  $q$  de l'équation 1 par la méthode d'Evans (Florinsky 1998) :

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{z_1 + z_3 + z_4 + z_6 + z_7 + z_9 - 2(z_2 + z_5 + z_8)}{3w^2} \quad (\text{Équation 2})$$

$$t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9 - 2(z_4 + z_5 + z_6)}{3w^2} \quad (\text{Équation 3})$$

$$s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{z_3 + z_7 - z_1 - z_9}{4w^2} \quad (\text{Équation 4})$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{6w^2} \quad (\text{Équation 5})$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9}{6w^2} \quad (\text{Équation 6})$$

En déplaçant la sous matrice sur la totalité d'un MNT, il est donc possible de calculer les valeurs de  $r$ ,  $t$ ,  $s$ ,  $p$  et  $q$  pour tous les points de ce dernier, à l'exception des contours.

L'équation 1 peut aussi être écrite sous la forme d'une conique générale :

$$\frac{rx^2}{2} + hy^2 + 2jx + 2ky + m = 0 \quad (\text{Équation 7})$$

$$\text{où } h = \frac{s}{2}, j = \frac{p}{2}, k = \frac{q}{2}, m = u - z$$

D'un point de vue géométrique, les coniques sont des courbes obtenues par l'intersection d'un cône par un plan. Selon l'orientation du plan par rapport à l'axe du cône

on obtient trois types de courbes (figure 7), en fonction des valeurs des coefficients  $\frac{r}{2}$ ,  $\frac{t}{2}$

et  $h$  (Stephenson 1973 ; Wood 1996) :

- une ellipse si  $\frac{rt}{4} - h^2 > 0$  ;
- une parabole si  $\frac{rt}{4} - h^2 = 0$  ;
- une hyperbole si  $\frac{rt}{4} - h^2 < 0$ .

Ces formes générales correspondent aux types de traits géomorphologiques, et peuvent être employées pour l'identification de ces éléments du relief (Wood 1996).

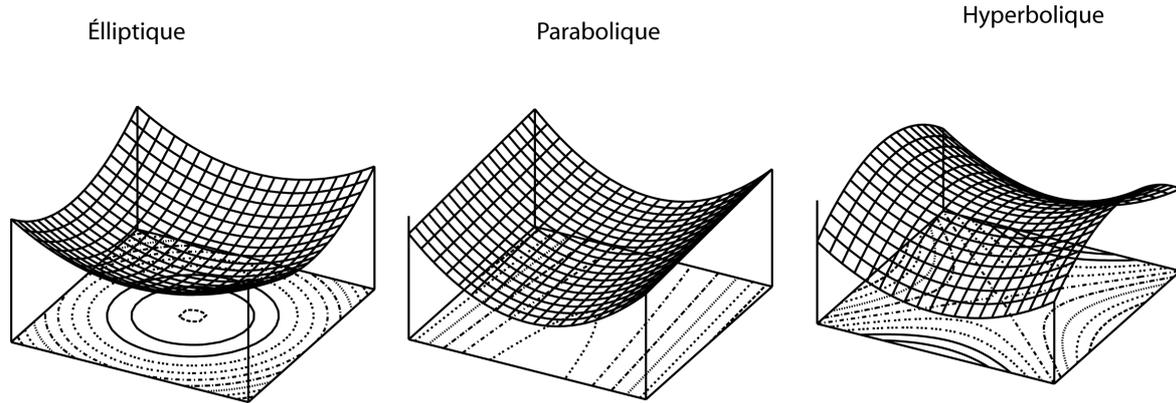


Figure 7 : Classification des types de surfaces quadratiques

Les propriétés topographiques (caractères morphométriques) sont importantes pour la description. C'est à partir de l'équation 2 que sont évalués les cinq paramètres cités plus haut. Il s'agit en fait de dérivées de premier et de second ordre de cette équation.

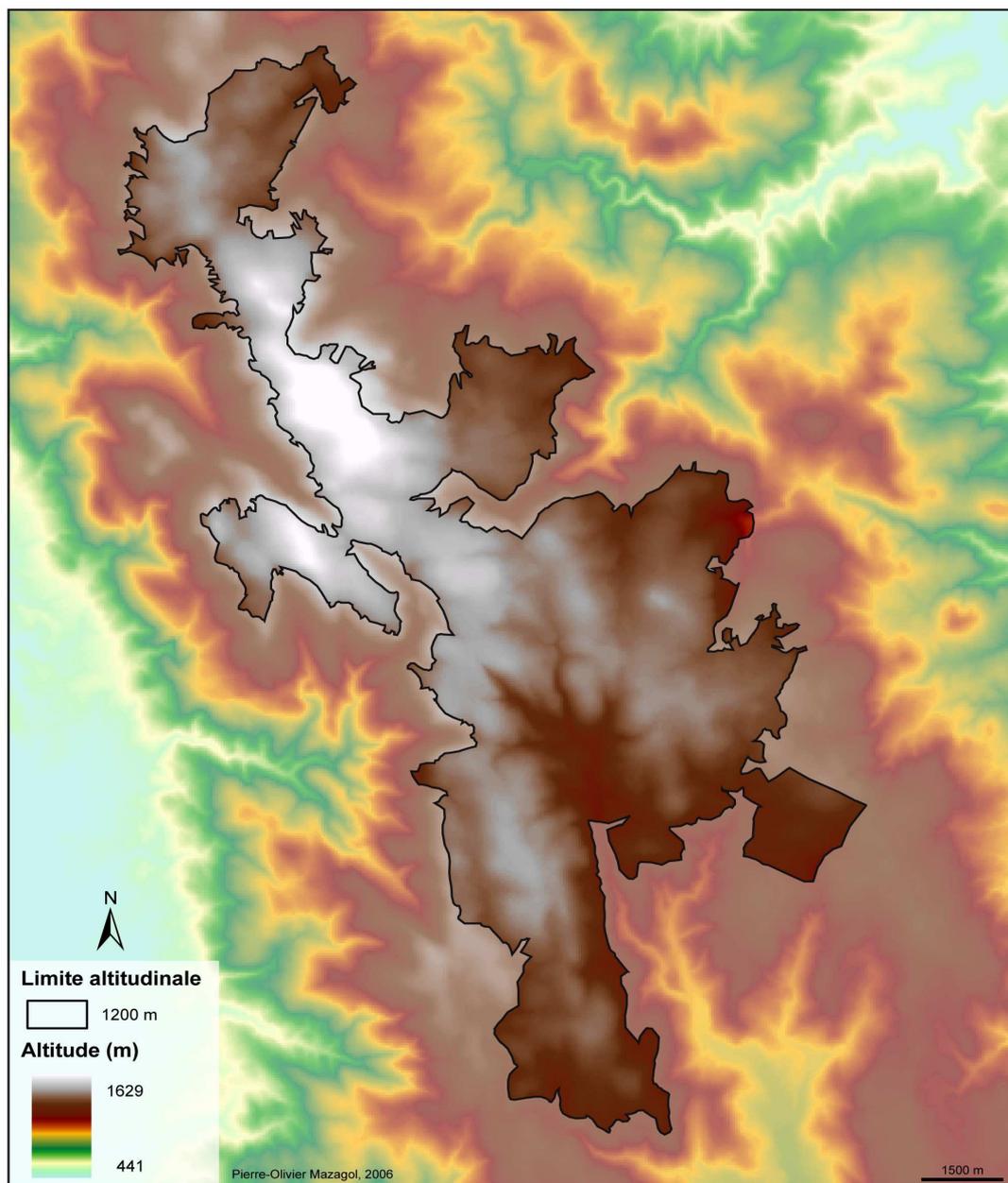
Dérivées	Paramètres
d'ordre 0	Altitude
du premier ordre	Pente
	Orientation
du second ordre	Courbure verticale
	Courbure horizontale

Tableau 1 : Les cinq paramètres morphologiques, dérivées de l'équation de la surface

■ L'altitude

Comme nous venons de le voir, l'altitude est directement donnée par le MNT (carte 3) et par extension, par l'équation 1. Les dérivées de cette équation permettent donc d'obtenir les valeurs d'autres variables. Un certain nombre d'indices présentés ci-après sont estimés à l'aide d'algorithmes appliqués sur des voisinages de cellules. Il est donc possible d'utiliser différentes tailles de noyaux de cellules. Nous indiquerons à chaque fois quelles tailles de noyaux ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $9 \times 9$ ,  $20 \times 20$  ou  $30 \times 30$ ) ont été utilisées mais nous ne présenterons qu'une seule carte à chaque fois. Le choix sera basé sur la qualité de

l'information d'un point de vue graphique et notamment quant à la mise en évidence des grands traits morphologiques selon notre connaissance du terrain. Ce choix quelque peu subjectif permet de clarifier l'exposé. Nous reviendrons plus loin dans notre travail sur les conséquences de cette variation sur la caractérisation de l'indice considéré.



Carte 3 : Cartographie de la distribution des altitudes (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

■ La pente

La pente peut être définie comme étant l'inclinaison de la surface de la terre, indiquée en degré.

La pente est l'angle ( $\alpha$ ) entre le plan S tangent à la surface du terrain et le plan P, au point A (figure 8).

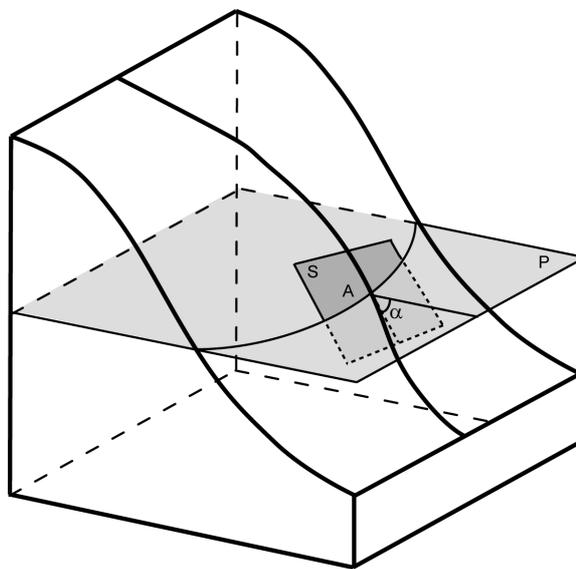


Figure 8 : Représentation 3D de la notion de pente (modifiée d'après Florinsky)

Elle est donnée par la combinaison des deux composants des dérivées partielles de l'équation 1. Dans le cas d'une équation aux dérivées partielles (EDP), la fonction inconnue dépendant de plusieurs variables indépendantes (dérivées partielles de l'équation 1).

$$\frac{dz}{dxy} = \sqrt{\left(\frac{\delta z}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta y}\right)^2} \quad (\text{Équation 8})$$

Les deux dérivées partielles pour x et y sont données par :

$$\frac{\delta z}{\delta x} = rx + sy + p \quad (\text{Équation 9})$$

et

$$\frac{\delta z}{\delta y} = ty + sx + q \quad (\text{Équation 10})$$

Seule la pente au point central de la surface quadratique nous intéresse. En adoptant un système de coordonnées locales avec origine située en ce point, nous pouvons combiner les équations 8, 9 et 10 où  $x = y = 0$  donnant,

$$\frac{dz}{dxy} = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (\text{Équation 11})$$

La valeur de pente étant généralement donnée en degrés, on obtient donc :

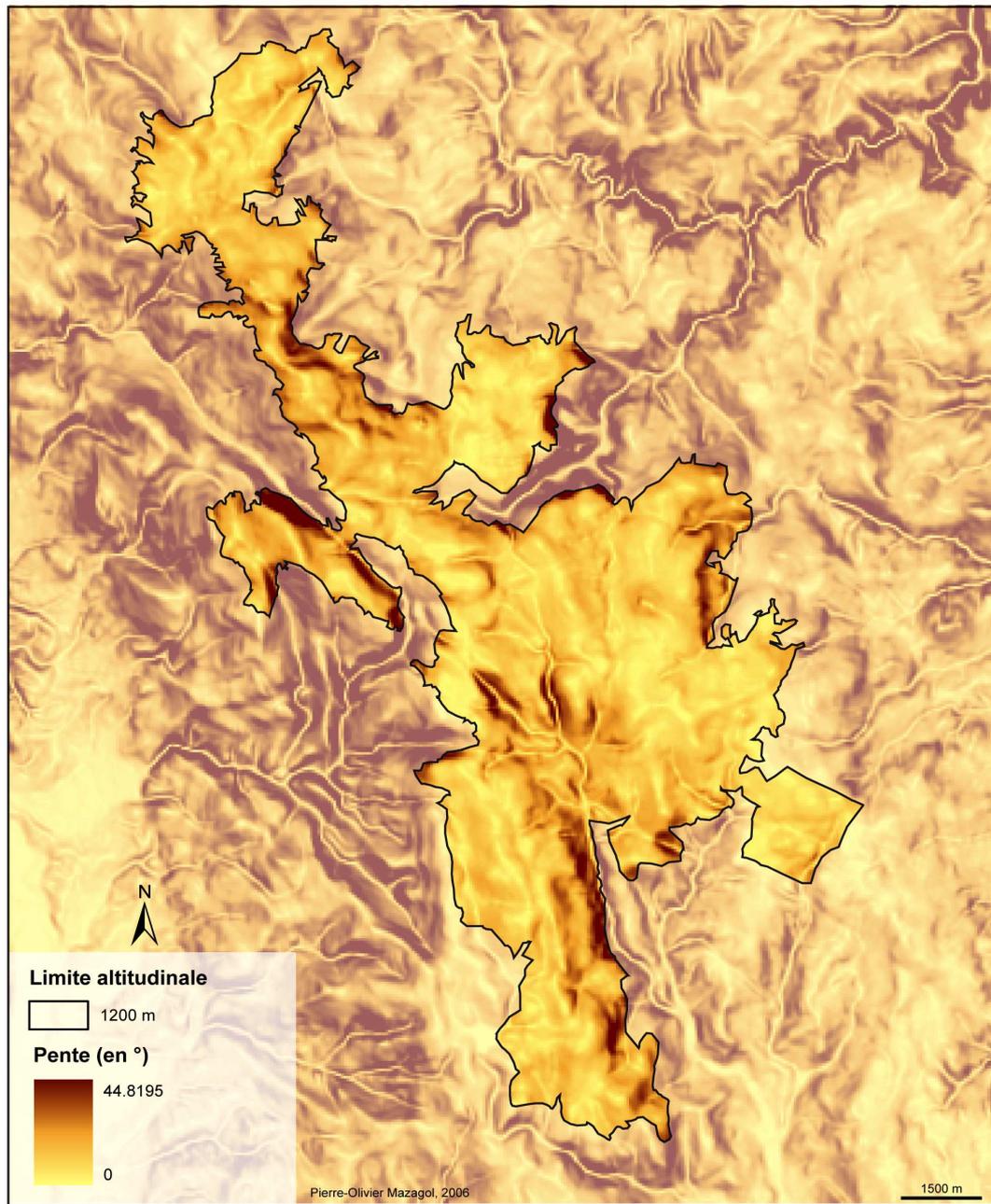
$$pente = \arctan(\sqrt{p^2 + q^2}) \quad (\text{Équation 12})$$

Cette définition est conforme à celles rapportées dans la littérature (Evans 1979 ; Florinsky 1998 ; Shary 1995 ; Skidmore 1989 ; Zevenbergen et Thorne 1987).

Ce gradient de pente est estimé en utilisant le logiciel Landserf 2.2 (Wood 1996 ; Wood 2004) (carte 4).

Cette estimation est effectuée sur un noyau de pixels dont la taille est configurée par l'utilisateur.

Les pentes ont été évaluées pour des noyaux de 3 cellules par 3, 5 cellules par 5 et 9 cellules par 9.



Carte 4 : Cartographie des pentes des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 3 cellules par 3)

■ L'exposition

L'exposition correspond à la direction de pente. Elle est donnée par l'angle ( $\beta$ ), mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre, entre la projection  $e'$  du vecteur normal  $e$  sur le plan P et la direction Nord au point A (figure 9).

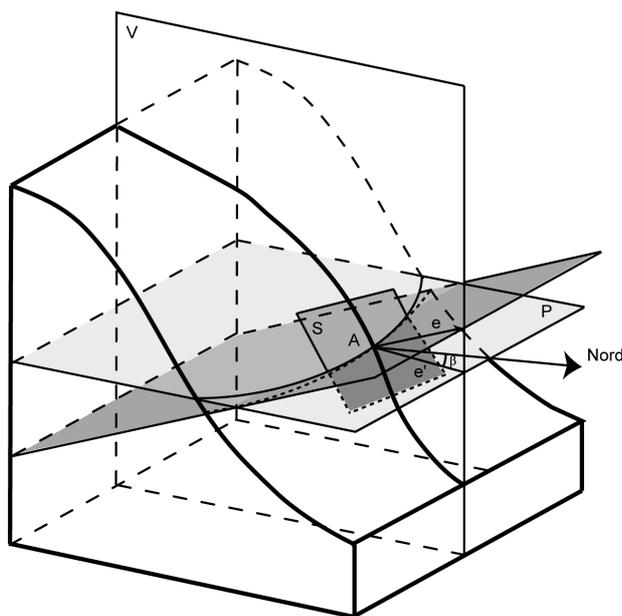
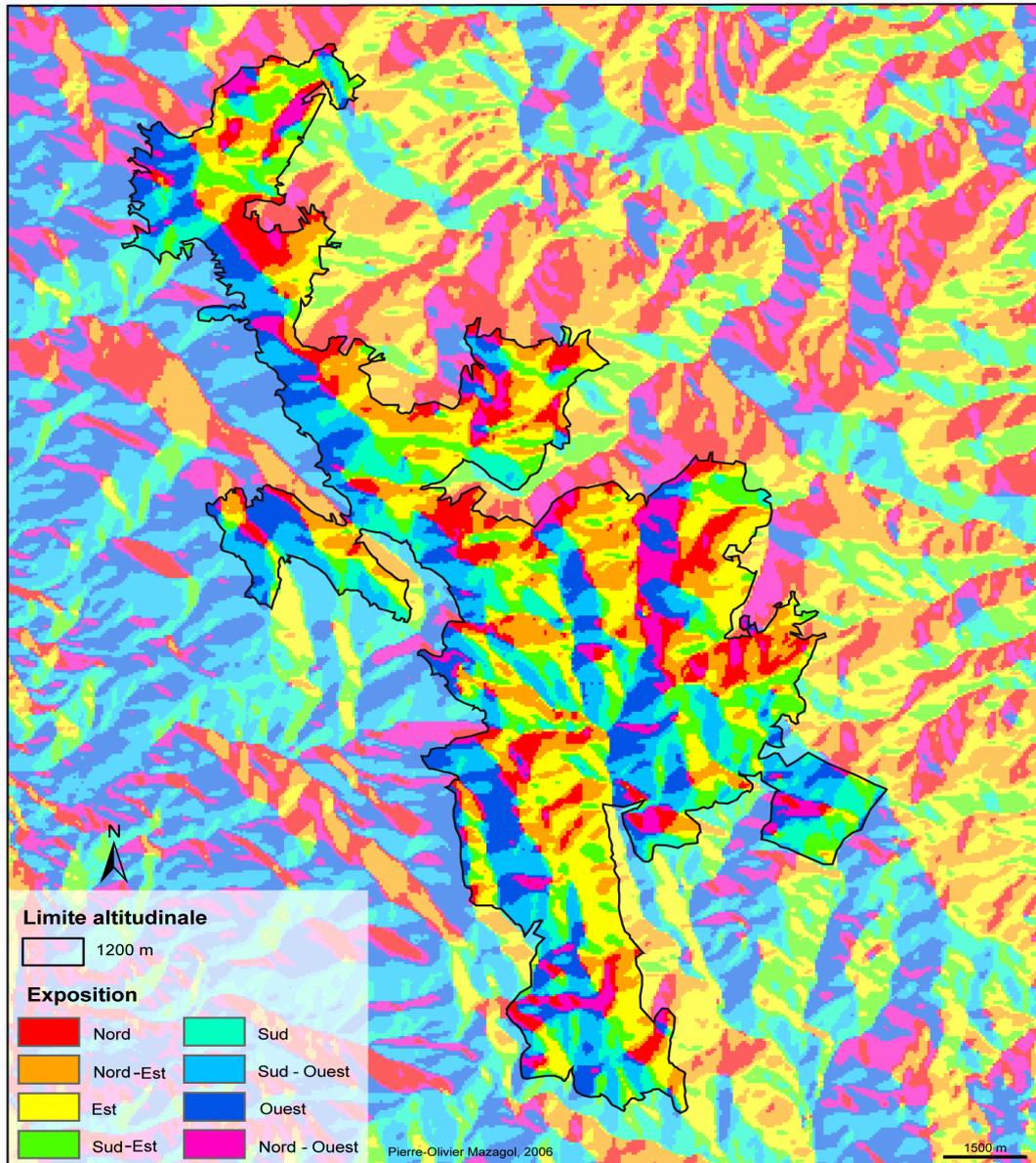


Figure 9 : Représentation de la notion d'exposition (modifiée d'après Florinsky)

Dans la continuité de l'évaluation de la pente, l'exposition correspond simplement à l'angle polaire décrit par les deux dérivées partielles orthogonales :

$$exposition = \arctan\left(\frac{q}{p}\right) \text{ (Équation 13)}$$

Elle est indiquée en degrés, le nord correspondant à 0 et 360°. Nous avons là encore utilisé Landserf 2.0 et nous avons choisi de considérer trois tailles de noyaux : 3 cellules par 3, 5 cellules par 5 et 9 cellules par 9 (carte 5).



Carte 5 : Cartographie des expositions des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 3 cellules par 3)

- Les convexités ou courbures

Ce sont des dérivées de second ordre de l'altitude. Elles sont généralement exprimées en  $m^{-1}$ . Ces indices sont calculés avec Landserf 2.2 et nous avons là encore choisi de considérer trois tailles de noyaux de 3 cellules par 3, 5 cellules par 5 et 9 cellules par 9.

L'évaluation de ces dérivées de second ordre passe par l'estimation de cette mesure pour un plan d'intersection de manière à réduire l'expression à une différentielle ordinaire (EDO, c'est-à-dire une équation différentielle dont la fonction inconnue (la variable dépendante) ne dépend que d'une seule variable indépendante).

Nous disposons alors de plusieurs types de courbures, en fonction de l'orientation du plan d'intersection. Ce dernier sera un plan vectoriel pouvant être défini uniquement par deux vecteurs. Le type de courbure le plus approprié dépendra en partie de la surface modélisée.

La simplicité tant dans le calcul que dans l'interprétation induit souvent l'utilisation des courbures moyenne (Mitasova et Hofierka 1993), verticale ou horizontale (Evans 1979). Pour une analyse géomorphologique, il sera aussi intéressant de connaître par exemple, la courbure transversale et celle longitudinale (Wood 1996).

- *La courbure verticale*

La courbure verticale correspond à la forme de la section BCA de la surface de terrain considérée avec le plan V (incluant le vecteur gravité  $g$ ) au point A (figure 10).

Elle rend compte, pour les valeurs positives, de l'accélération des flux vers l'aval, les processus gravitationnels étant maximisés, ou de leur décélération pour les valeurs négatives. La courbure verticale correspond à la courbure suivant un plan d'intersection déterminé par l'axe Z et l'orientation.

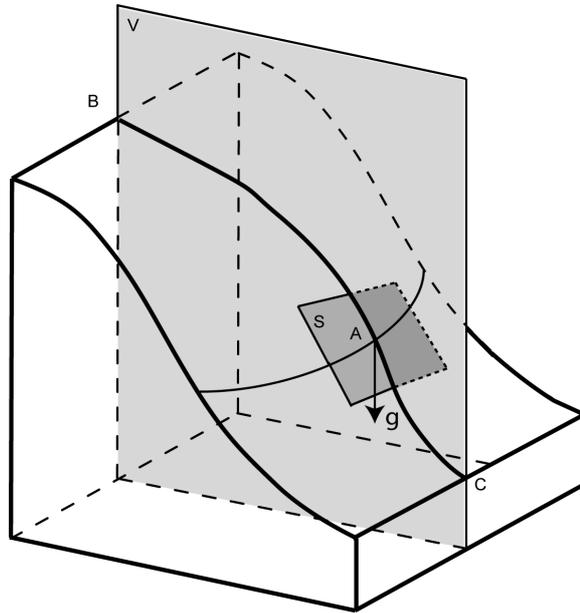


Figure 10 : Représentation 3D de la notion de la courbure verticale (modifiée d'après Florinsky)

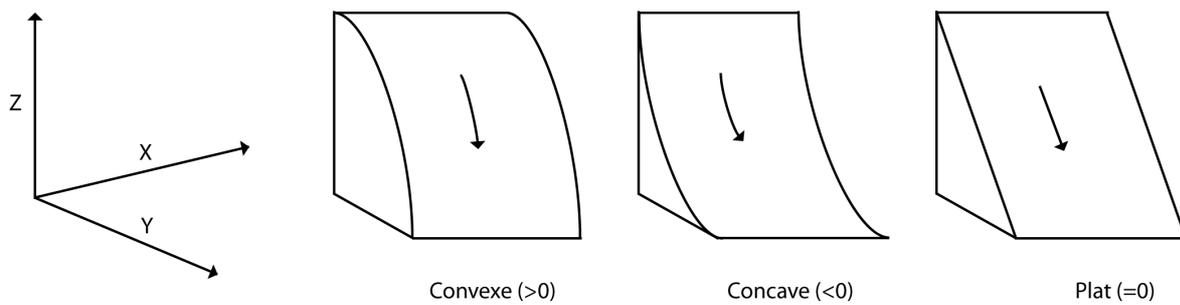
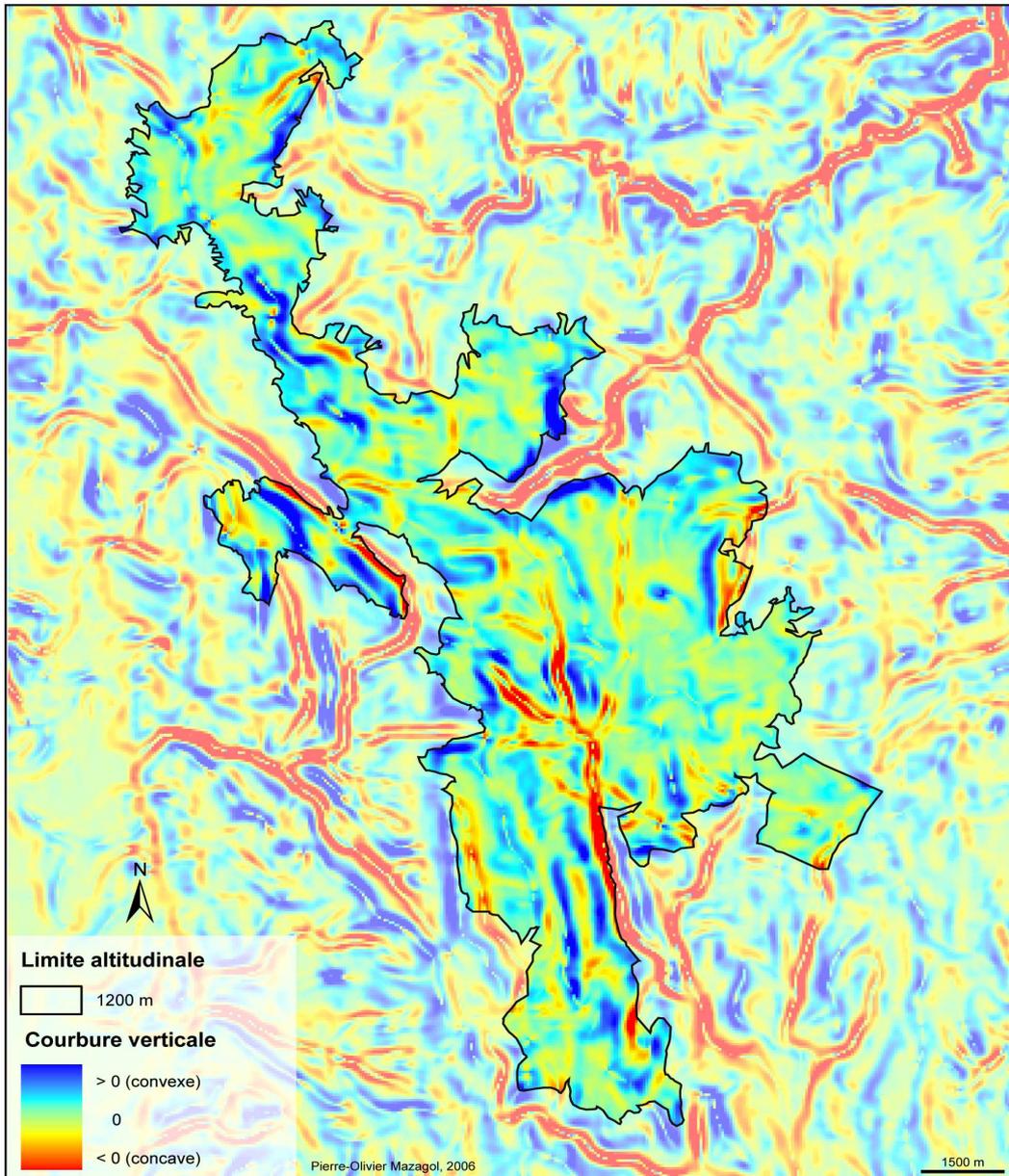


Figure 11 : Trois cas de figure pour la courbure verticale (d'après Florinsky)

Evans définit la courbure verticale par la formule (Evans 1979) :

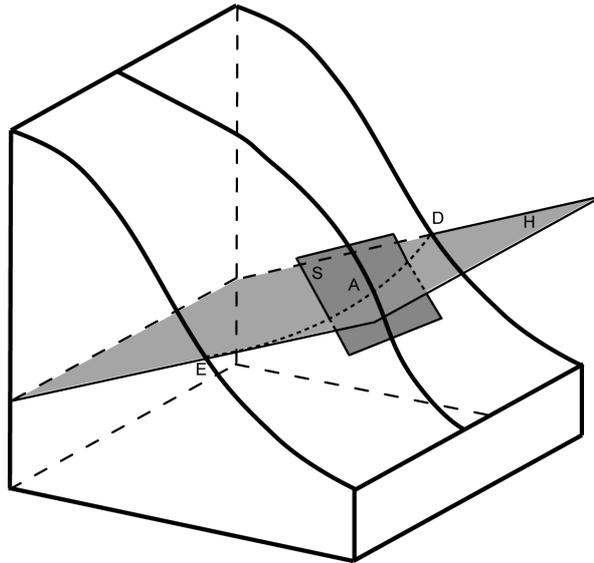
$$C_v = \frac{-100(rp^2 + tq^2 + 2spq)}{(q^2 + p^2)(1 + p^2 + q^2)^{1.5}} \quad (\text{Équation 14})$$



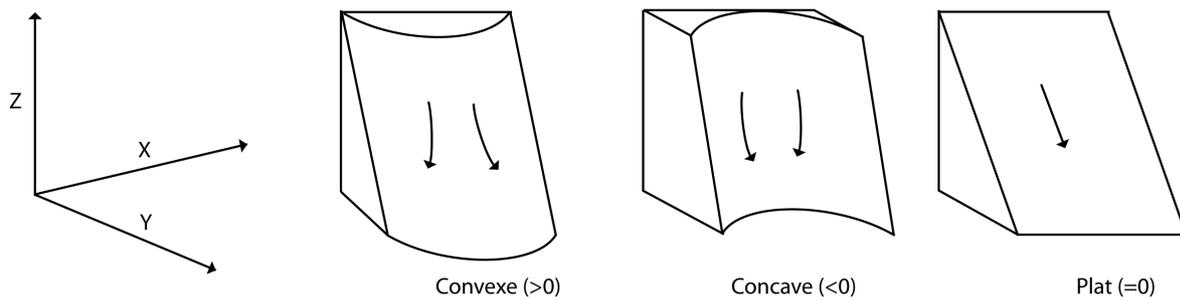
Carte 6 : Cartographie des courbures verticales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9)

○ *La courbure horizontale*

La courbure horizontale est la courbure selon la section DAE de la surface de terrain considérée. Cette section est orthogonale à la section de la courbure verticale (figure 12).

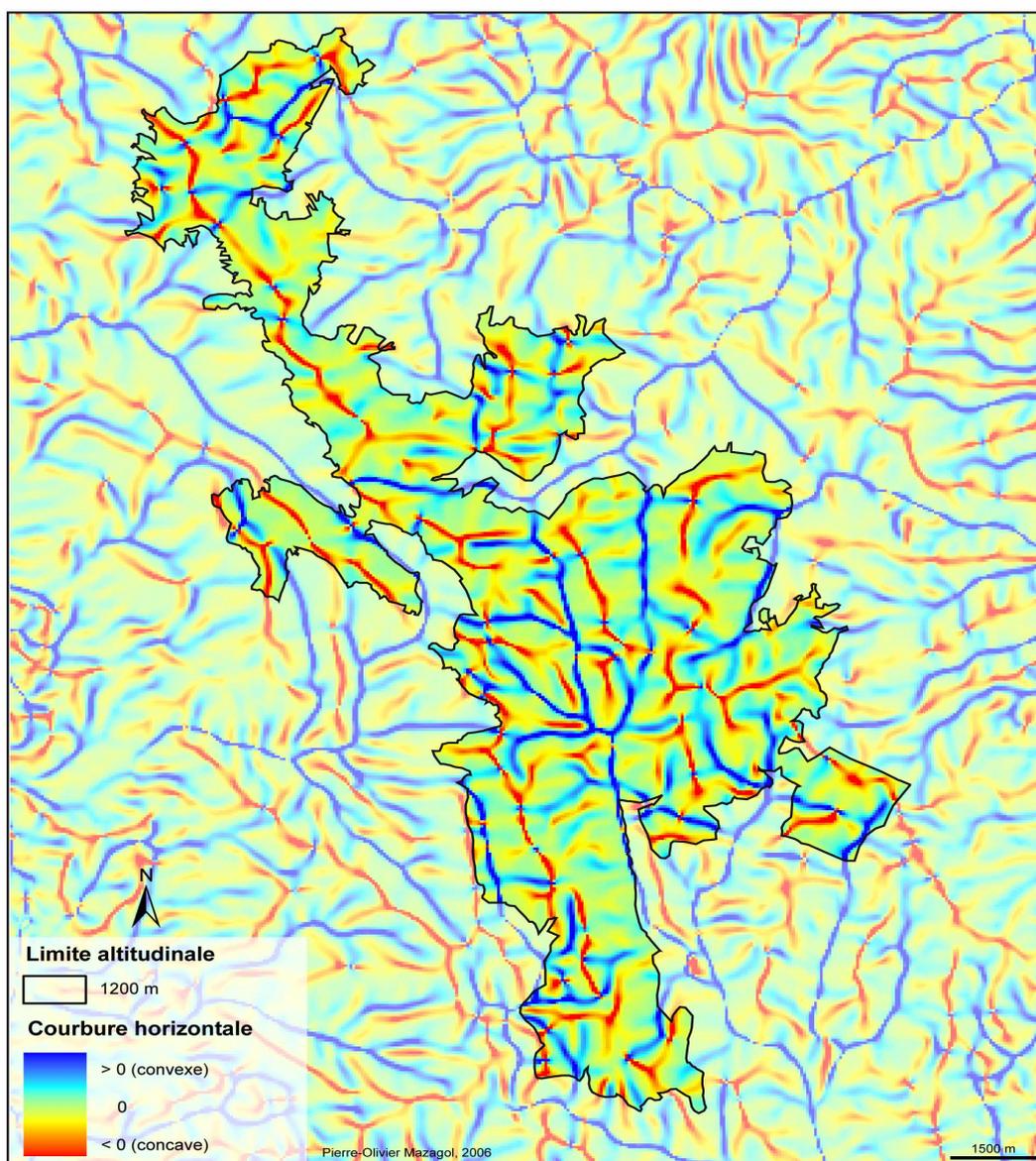


*Figure 12 : Représentation 3D de la notion de courbure horizontale (d'après Florinsky)*



*Figure 13 : Trois cas de figure pour la courbure horizontale*

Elle rend compte, pour les valeurs positives, de la divergence des écoulements le long des lignes de plus grandes pentes, les processus gravitationnels étant minimisés, ou de leur convergence pour les valeurs négatives.



Carte 7 : Cartographie des courbures horizontales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9)

La courbure horizontale correspond à la courbure suivant un plan d'intersection déterminé par les axes X et Y.

Evans définit la courbure horizontale par la formule (Evans 1979) :

$$C_h = \frac{-100(tp^2 + rq^2 + 2spq)}{(q^2 + p^2)^{1.5}} \quad (\text{Équation 15})$$

Il est important de signaler que Jo Wood prend une valeur opposée (Wood 1996). Ainsi, dans la cartographie ci-dessous, les courbures convexes sont négatives. Ce sont ces valeurs que nous conserverons par la suite sauf pour le calcul de la courbure d'accumulation afin de respecter la méthode de classification utilisée par Florinsky et Shary (Florinsky 2000 ; Shary 1995).

- *La courbure maximale et la courbure minimale.*

Les deux mesures précédentes nécessitent une pente non nulle.

En effet, d'après l'équation 14, la pente est nulle lorsque :

$$\arctan(\sqrt{q^2 + p^2}) = 0$$

$$\text{donc lorsque } \sqrt{q^2 + p^2} = 0$$

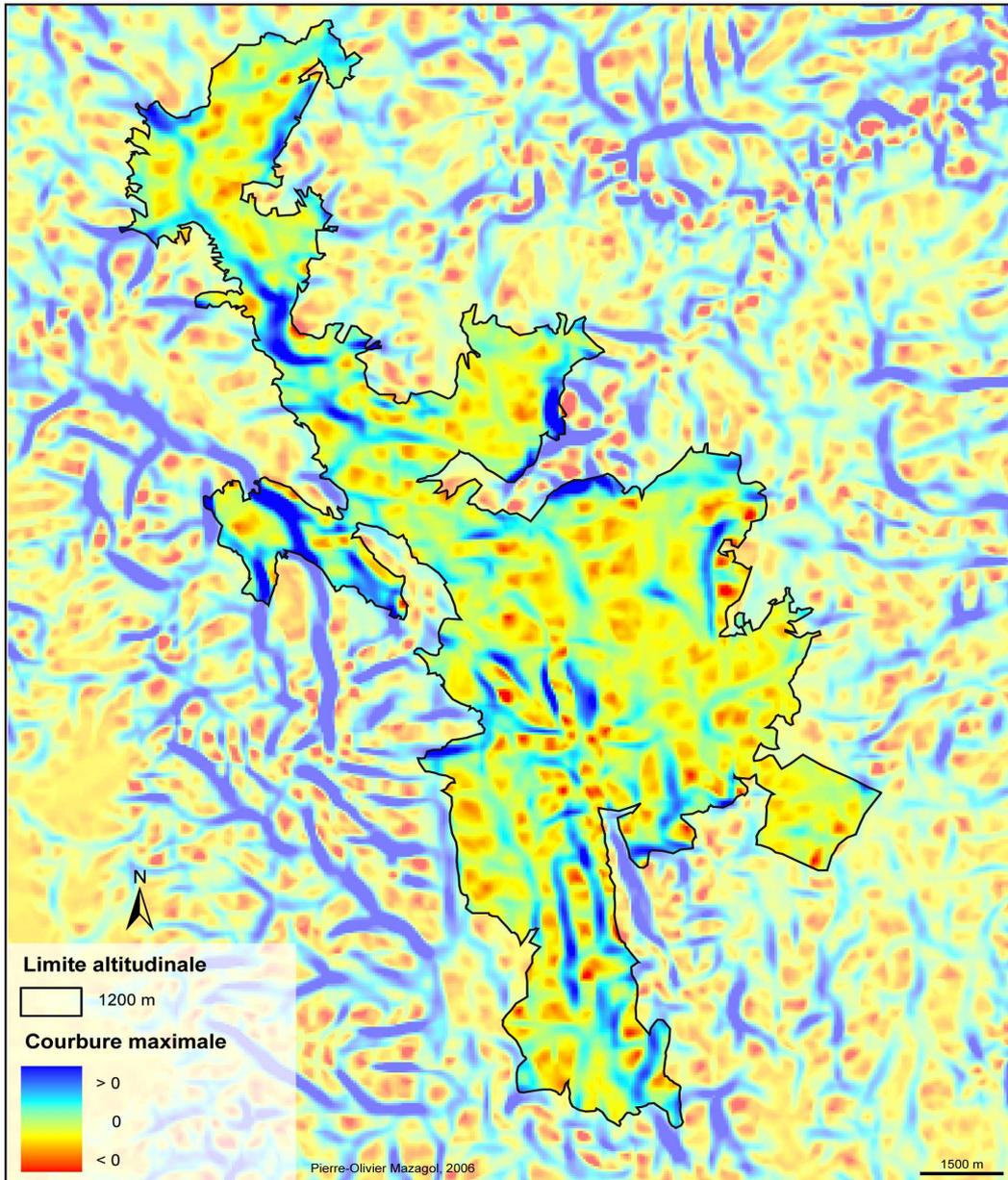
$$\text{c'est-à-dire } q^2 + p^2 = 0$$

$$\text{donc lorsque } q = 0 \text{ et } p = 0$$

Or, dans ces conditions, il est impossible de calculer les courbures verticale et horizontale car  $(q^2 + p^2)(1 + p^2 + q^2)^{1.5}$  et  $(q^2 + p^2)^{1.5}$  (les dénominateurs des équations 14 et 15) sont nuls.

Evans suggère de mesurer les courbures verticales maximale et minimale (Evans 1979).

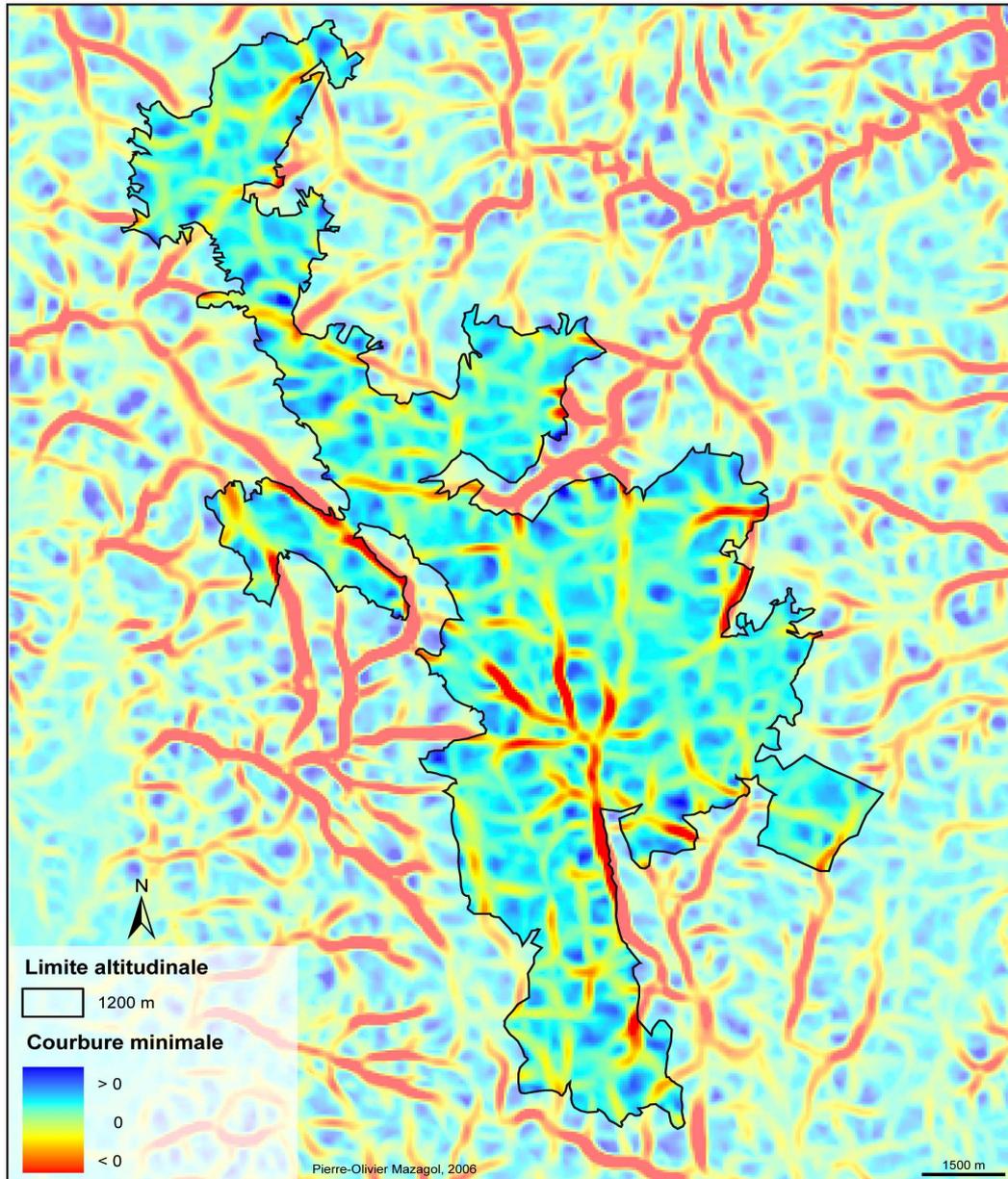
$$\text{Courbure maximale (carte 8) : } C_{v\_MAX} = -\left(\frac{r+t}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{r-t}{2}\right)^2 + s^2} \quad (\text{Équation 16})$$



Carte 8 : Cartographie des courbures maximales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9)

et

**Courbure minimale** (carte 9) :  $C_{v\_MIN} = -\left(\frac{r+t}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{r-t}{2}\right)^2 + s^2}$  (Équation 17)

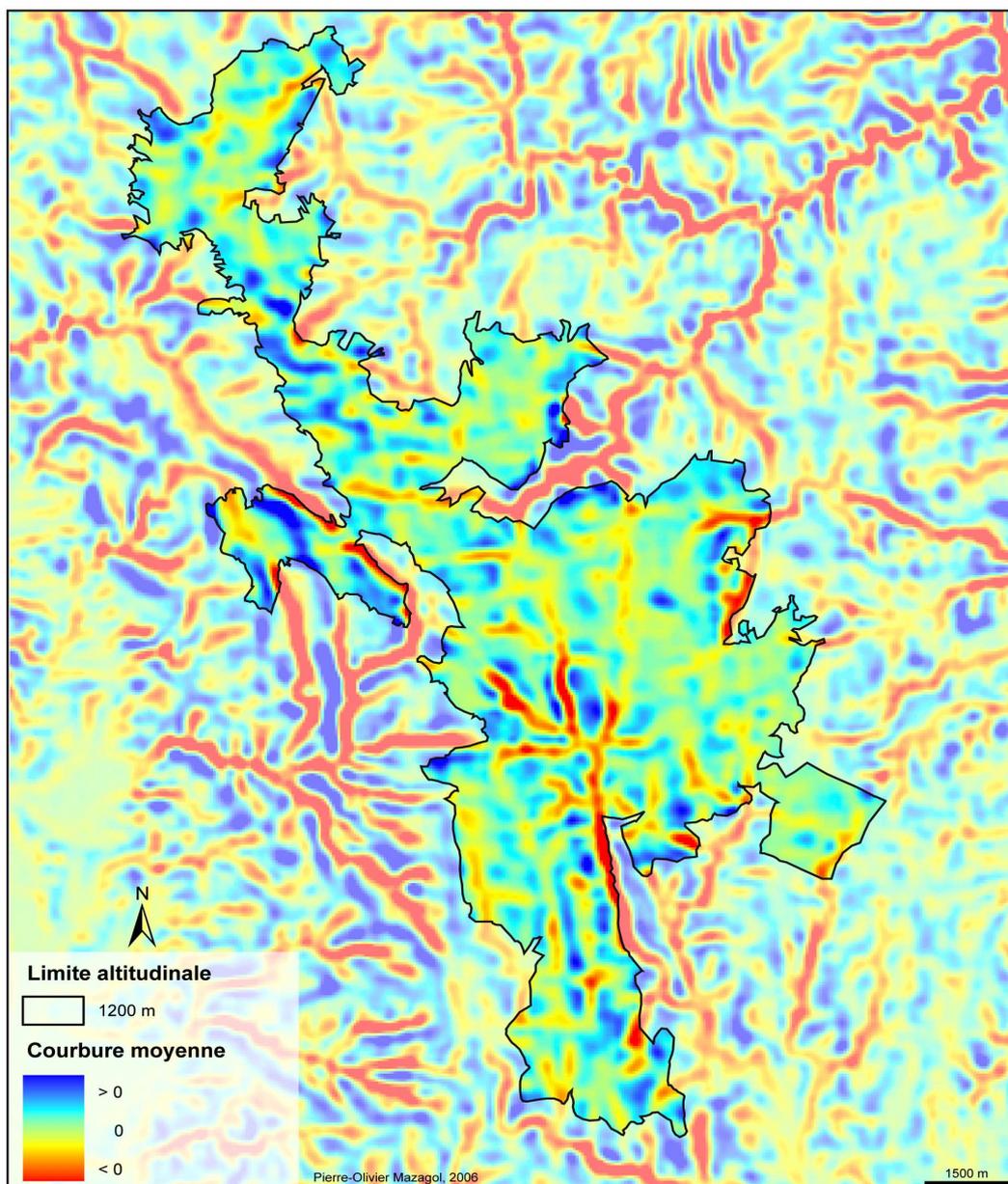


*Carte 9 : Cartographie des courbures minimales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9)*

Pour le cas elliptique, les deux valeurs auront le même signe. Pour le cas parabolique, une des valeurs sera de zéro. Pour le cas hyperbolique, les deux courbures seront dans de signes opposés.

○ *La courbure moyenne*

La courbure moyenne correspond à l'intersection entre la surface quadratique et le plan décrit par l'exposition et la pente (Wood 1996).



Carte 10 : Cartographie des courbures moyennes des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9)

Il s'agit de la moyenne des valeurs des courbures verticale et horizontale.

$$C_m = \frac{C_v + C_h}{2} \quad (\text{Équation 18})$$

Plus précisément, elle peut être obtenue par une dérivée partielle de l'équation 1.

Cette courbure moyenne correspond à l'intersection entre la surface et le plan caractérisé par la normale de la pente et l'exposition.

$$C_m = -\frac{(1+q^2)r - 2pqs + (1+p^2)t}{2\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \quad (\text{Équation 19})$$

- *Les courbures longitudinale et transversale*

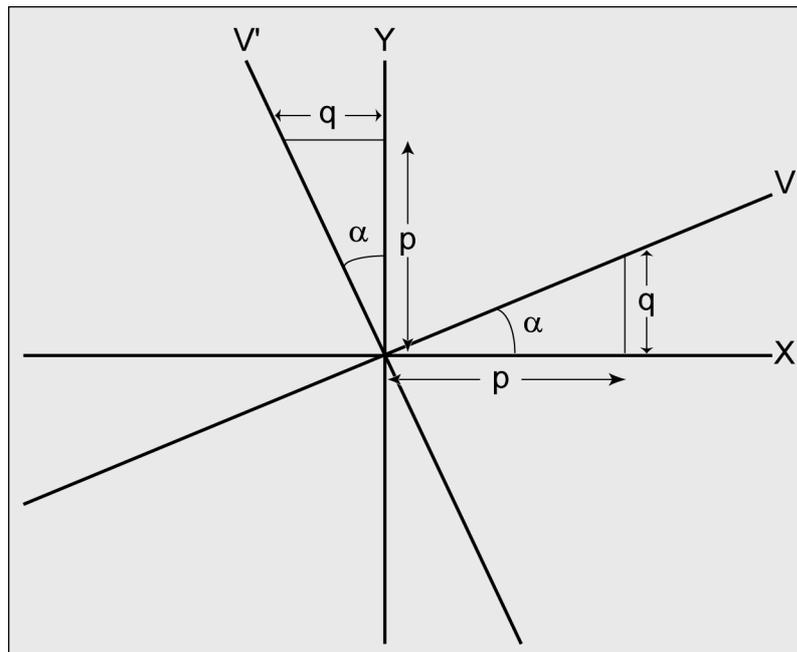


Figure 14 : Représentation géométrique des notions de courbures transversale et longitudinale

Pour estimer ces deux types de courbures, Jo Wood (Wood 1996) considère un vecteur  $v$  dont la force est proportionnelle à la pente au centre de la surface quadratique (où  $x = y = 0$ ) et un vecteur  $v'$  orthogonal à  $v$ .

L'angle  $\alpha$  correspond à l'exposition. Il est possible d'exprimer les distances le long des axes X et Y en fonction de  $v$  et  $\alpha$ , puis en fonction de  $p$  et  $q$ .

En utilisant les propriétés trigonométriques :

$$x = v \cos \alpha \text{ qui donne } \cos \alpha = \frac{x}{v}$$

et

$$y = v \sin \alpha \text{ .qui donne } \sin \alpha = \frac{y}{v}$$

En appliquant le théorème de Pythagore :

$$\cos \alpha = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2}}$$

et

$$\sin \alpha = \frac{q}{\sqrt{p^2 + q^2}}$$

On obtient donc :

$$x = \frac{vp}{\sqrt{p^2 + q^2}} \quad (\text{Équation 20})$$

et

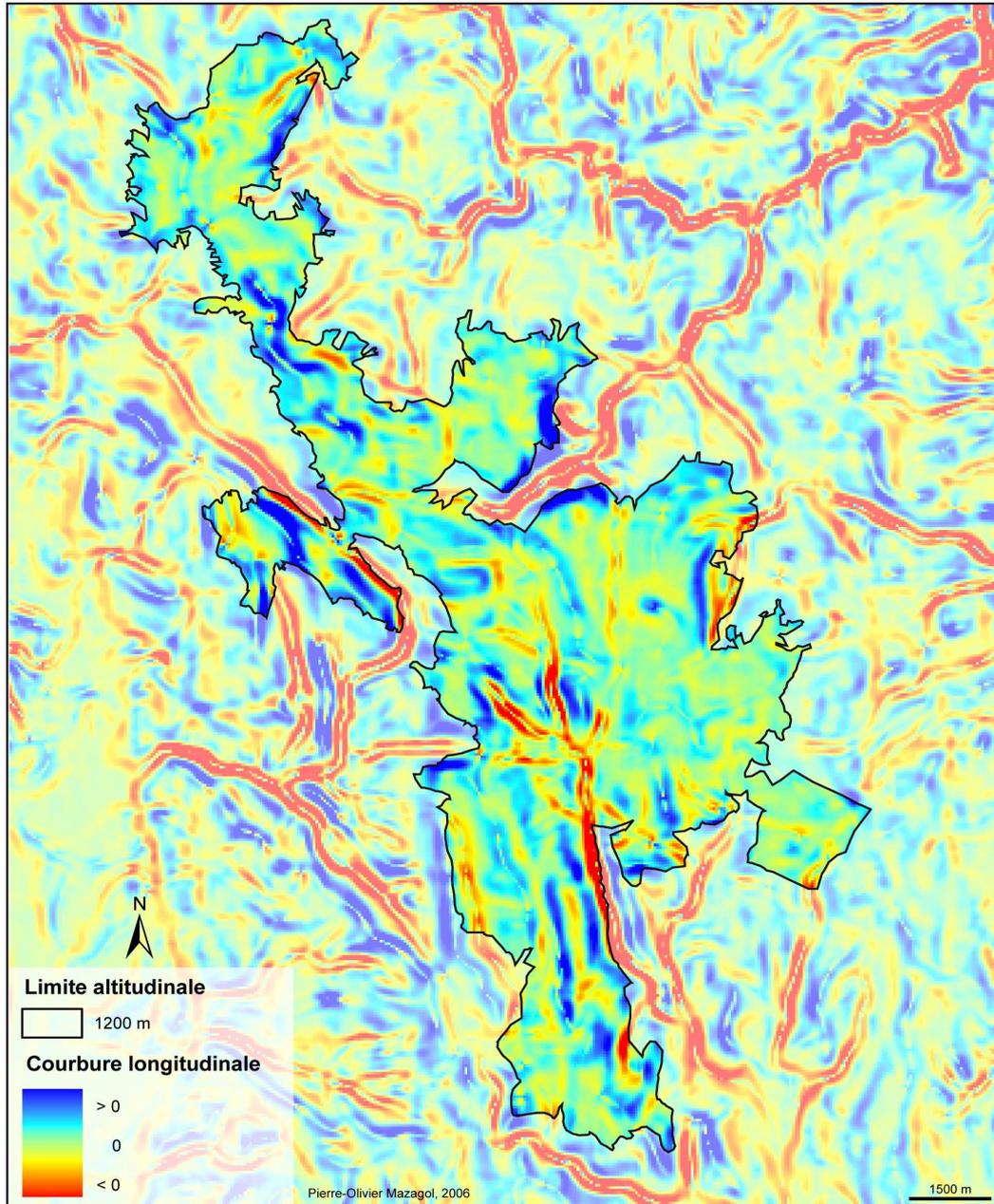
$$y = \frac{vq}{\sqrt{p^2 + q^2}} \quad (\text{Équation 21})$$

La mise en relation des équations 1, 20 et 21 nous donne alors :

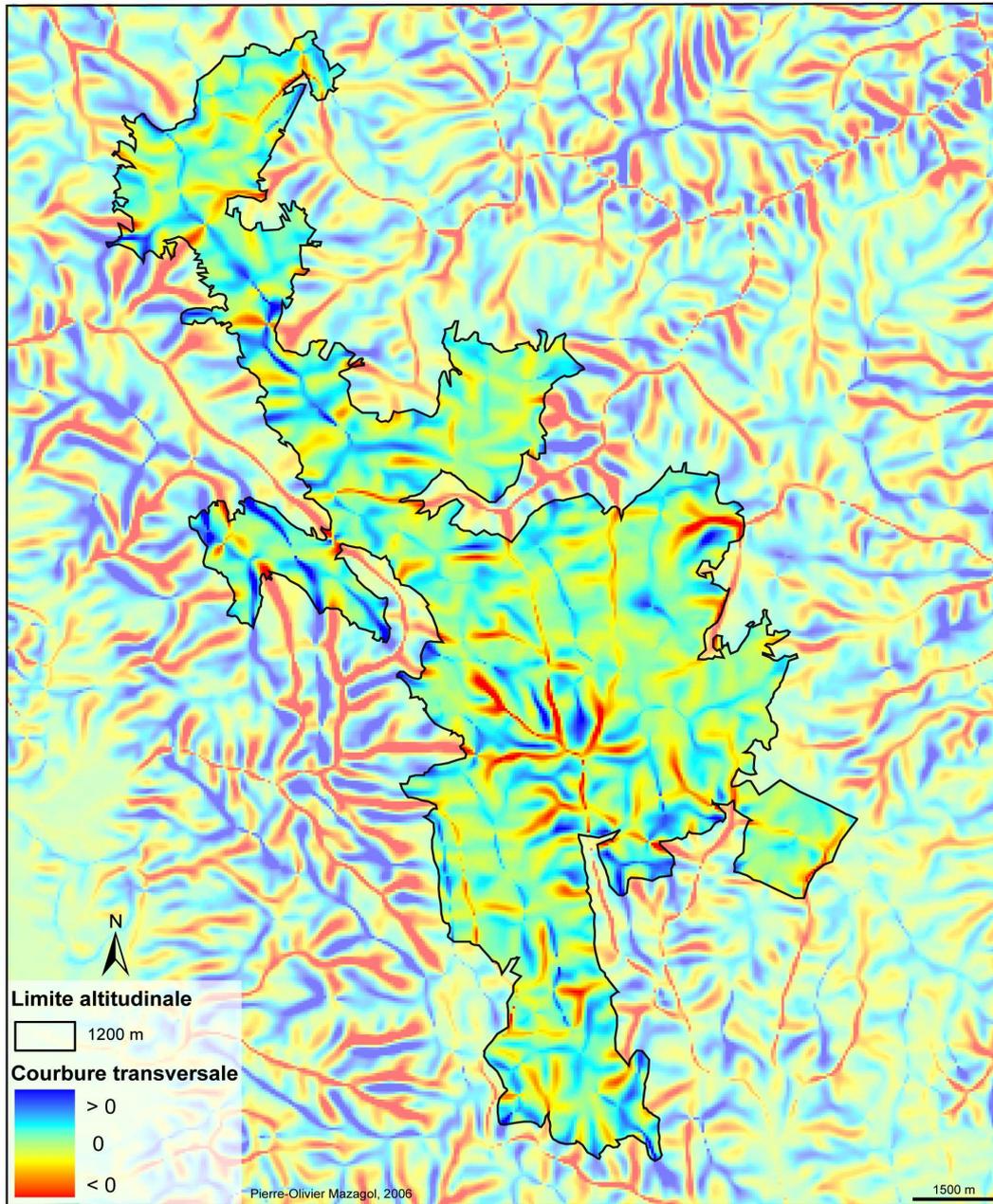
$$z = \frac{rv^2 p^2}{2(p^2 + q^2)} + \frac{tv^2 q^2}{2(p^2 + q^2)} + \frac{sv^2 pq}{p^2 + q^2} + \frac{vp^2}{\sqrt{p^2 + q^2}} + \frac{vq^2}{\sqrt{p^2 + q^2}} + u \quad (\text{Équation 22})$$

En simplifiant cette équation, on obtient :

$$z = \left( \frac{rp^2 + tq^2 + 2spq}{2(p^2 + q^2)} \right) v^2 + (\sqrt{p^2 + q^2})s + u \quad (\text{Équation 23})$$



Carte 11 : Cartographie des courbures longitudinales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9)



Carte 12 : Cartographie des courbures transversales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9)

La courbure de cette surface quadratique univariée peut-être obtenue par une dérivée ordinaire :

$$\frac{d^2z}{ds^2} = \frac{rp^2 + tq^2 + 2spq}{p^2 + q^2} \quad (\text{Équation 24})$$

La concavité est par convention donnée par un signe négatif. Cette valeur de courbure en pente descendante est désignée sous le nom de courbure longitudinale  $C_l$  (carte 11). Plus simplement, il s'agit de la courbure de la surface le long d'un plan déterminé par l'intersection de la pente normale et de l'exposition.

$$C_l = -\frac{rp^2 + tq^2 + 2spq}{p^2 + q^2} \quad (\text{Équation 25})$$

La courbure dans la direction orthogonale ou courbure transversale  $C_t$  (carte 12) est évaluée de la même façon mais avec  $p = -q$  et  $q = p$  :

$$C_t = -\frac{tp^2 + rq^2 - 2spq}{p^2 + q^2} \quad (\text{Équation 26})$$

Elle correspond à la courbure de la surface le long du plan déterminé par l'intersection de la pente normale et de la perpendiculaire à l'exposition. Les valeurs négatives sont caractéristiques de zones concaves (canaux) et les valeurs positives de zones convexes (crêtes).

○ *La courbure d'accumulation*

Enfin, il est possible de dresser la carte des zones d'accumulation, de transit et de dispersion du terrain (Florinsky 2000 ; Shary 1995). Les valeurs des courbures horizontale et verticale sont alors utilisées (figure 15) :

- Zones caractérisées par une convergence et un ralentissement de flux (zones d'accumulation) : courbures horizontale et verticale négatives ;
- Zones offrant une divergence et une accélération de flux (zones de dissipation) : courbures horizontale et verticale positives ;

- Zones sans action simultanée de convergence et de ralentissement de flux ou de divergence et d'accélération de flux (zones de transit) : courbures horizontale et verticale de signes opposés ou nulles.

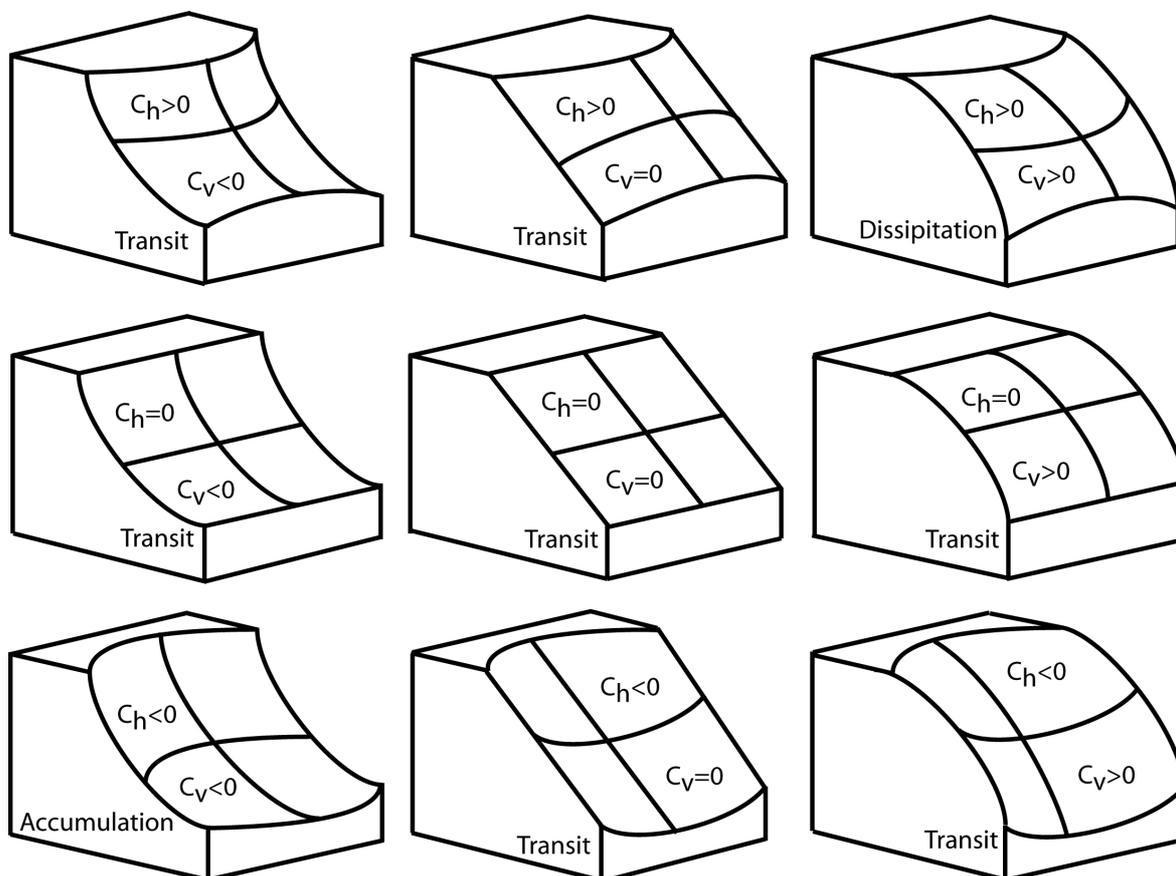
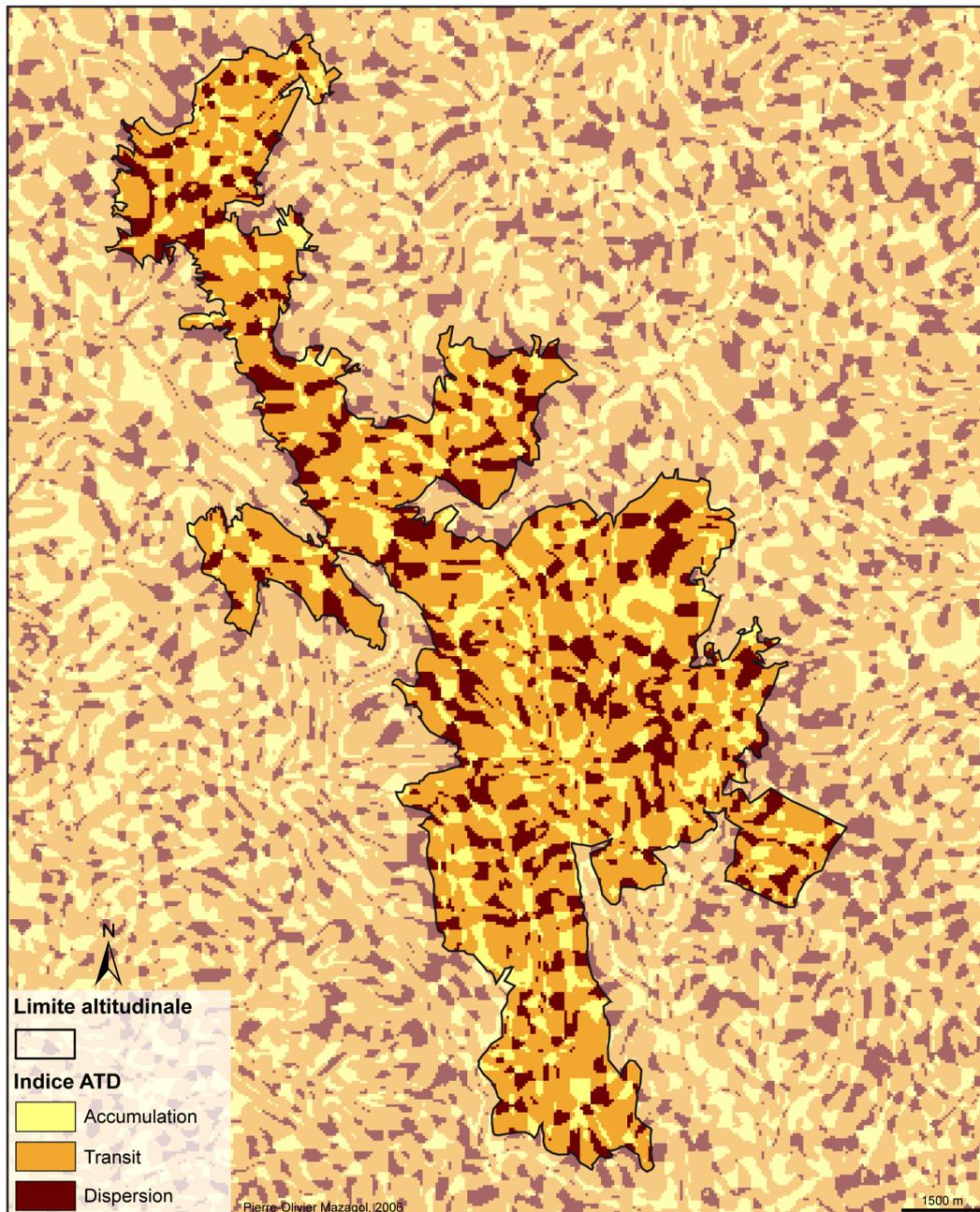


Figure 15 : Classification des formes de terrain par les signes des courbures verticale ( $C_v$ ) et horizontale ( $C_h$ ) (d'après Florinsky)

Mais le modèle numérique de terrain, nous permet également d'obtenir d'autres variables. Nous avons, par exemple, pris en compte la distance par rapport aux crêtes et aux canaux. En effet, l'utilisation de la pente associée aux courbures longitudinale, transversale, maximale et minimale permet d'extraire six grands traits du relief : crêtes, talwegs, plaines, pics, cols et fosses.

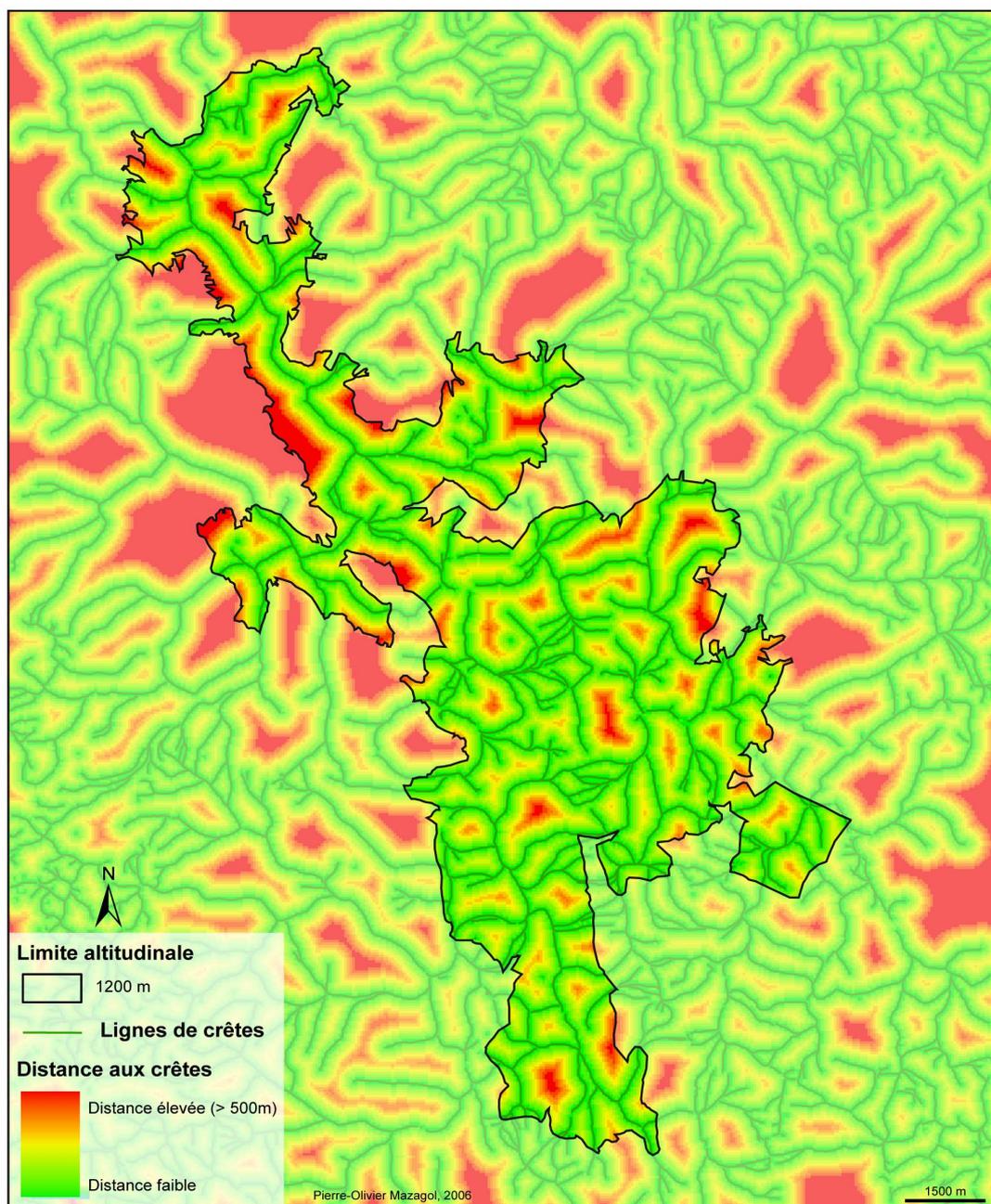
Crêtes et talwegs ont été extraits à l'aide du logiciel Landserf. La mise en place de zones tampons régulières autour de ces éléments permet de figurer la distance jusqu'à eux à partir de tout point de la zone d'étude.



Carte 13 : Cartographie des zones potentielles d'accumulation, de transit et de dissipation des écoulements (Hauts Chaumes des Monts du Forez)

- Distance par rapport à la crête la plus proche

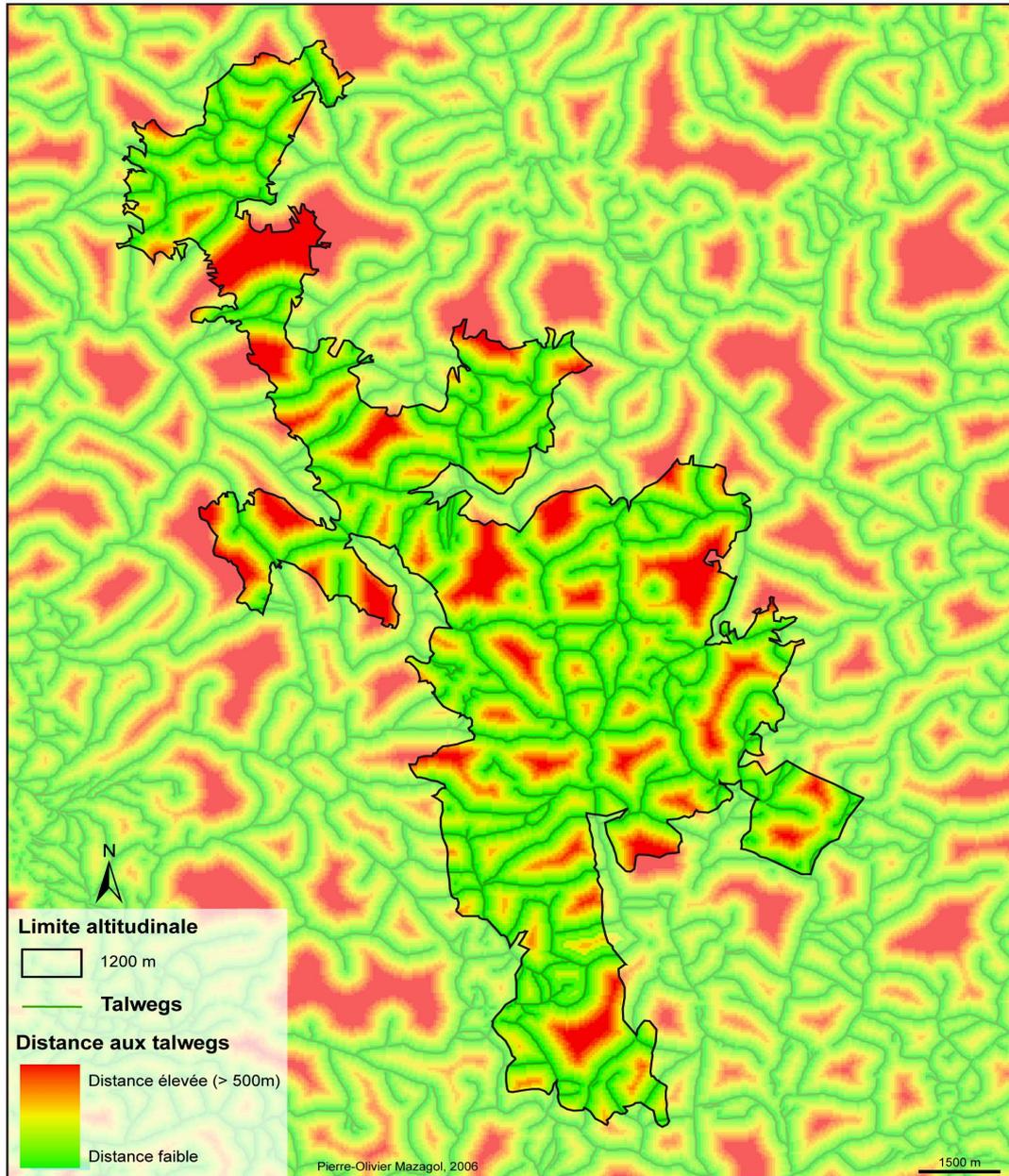
Cette valeur est obtenue en réalisant des zones tampons en anneaux concentriques autour des crêtes.



Carte 14 : Cartographie de la distance par rapport à la crête la plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

■ Distance par rapport au talweg le plus proche

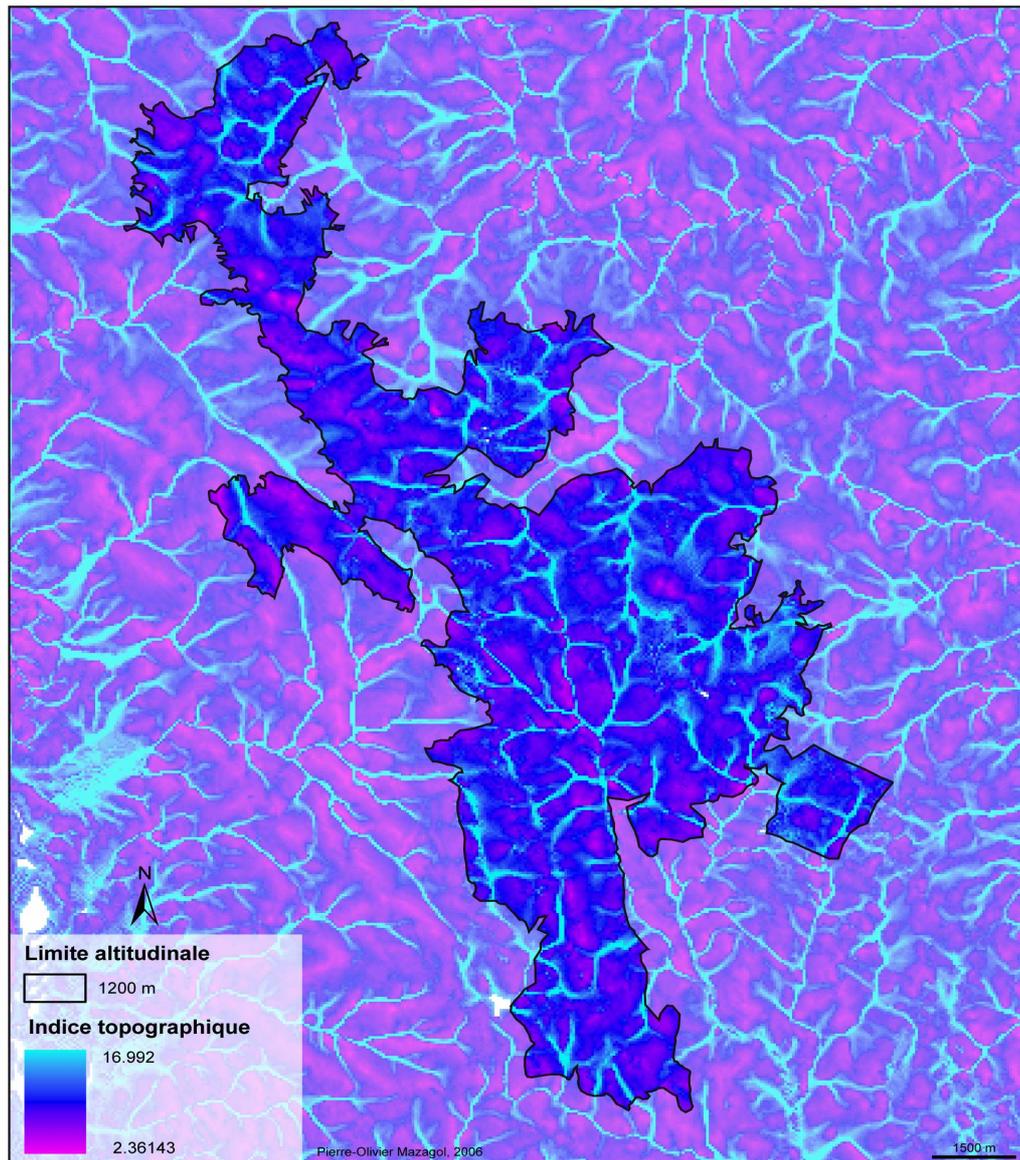
Ces distances sont obtenues comme précédemment, à savoir en réalisant des zones tampons en anneaux concentriques autour des talwegs.



Carte 15 : Cartographie de la distance par rapport au talweg le plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

■ L'indice d'humidité des sols

Cet indice, souvent utilisé dans les modèles hydrologiques, se rencontre sous différentes appellations dans la littérature : wetness index, topographic moisture index, Compound Topographic Index (CTI) (carte 16).



Carte 16 : Cartographie de l'indice d'humidité (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

Cet indice est fonction de la pente et de la surface drainée en amont et peut facilement être dérivé d'un MNT.

$$I_{humidité} = \ln\left(\frac{a_i}{\beta_i}\right) \quad (\text{Équation 27})$$

où  $a_i$  est la surface drainée en amont du point  $i$  et  $\beta_i$  la pente qui lui est associée.

Il s'agit donc d'un rapport entre bassin versant et pente (Beven et Kirkby 1979 ; Moore *et al.* 1991).

Son évaluation peut également prendre en compte la transmissivité locale et régionale du sol.

- La radiation solaire potentielle reçue et la durée d'insolation potentielle

Il s'agit d'une approximation du pouvoir de radiation solaire (exprimé en %) d'un point de vue spatial et temporel. Son influence est d'ordre climatique locale (cartes 17 et 18).

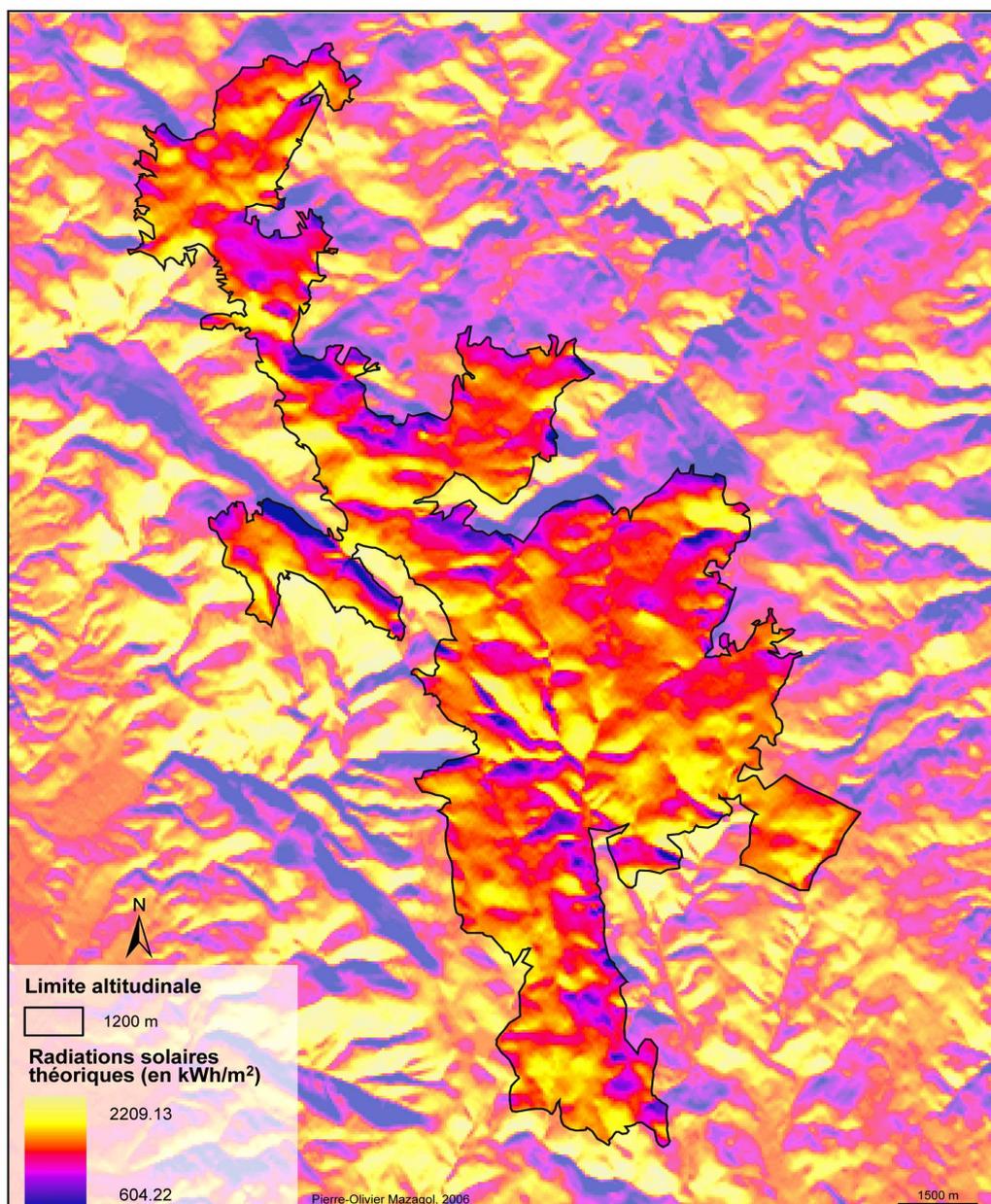
Cette variable a été évaluée à l'aide du logiciel SAGA 1.2.

Outre les informations altimétriques fournies par le MNT, les caractéristiques concernant le rayonnement et la période d'évaluation sont nécessaires : la constante solaire ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) et la Transmission (le Facteur de transmission) d'Atmosphère (60 %). Ces deux données conditionnent fortement les caractéristiques de la radiation qui atteint la Terre.

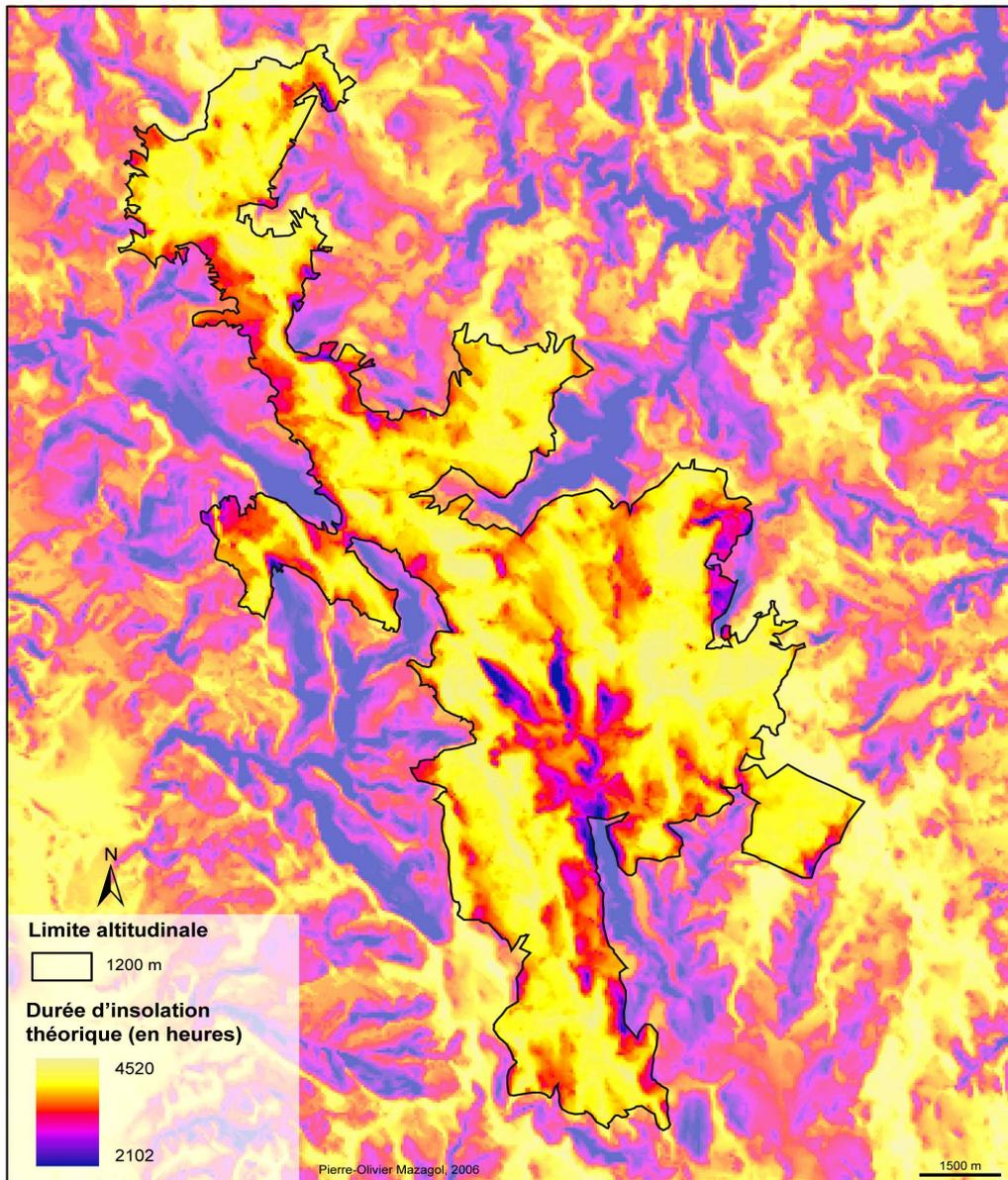
À une échelle plus locale, une autre variable s'avère nécessaire : il s'agit de la latitude du terrain d'étude influençant la position du soleil dans le ciel à l'instant ou durant la période choisie. Nous avons sélectionné une valeur de  $45^\circ$  (La latitude de Pierre-sur-Haute, point culminant (1634 m) de la zone d'étude étant de  $45^\circ 39'$ ).

L'algorithme peut être divisé en plusieurs étapes principales : la période de temps est divisée en termes de jours. Puis plusieurs instants (régulièrement espacés) sont définis dans chaque jour. Pour chacun de ces instants (correspondant à une position particulière du

soleil), le rayonnement solaire est calculé pour chaque cellule du grid, en utilisant l'information d'altitude contenue dans le M.N.T. Les différents grids de rayonnement solaire étant calculés, un grid de rayonnement quotidien peut être créé. Avec tous les grids de rayonnement quotidien, un grid de rayonnement est calculé pour la période définie au départ.



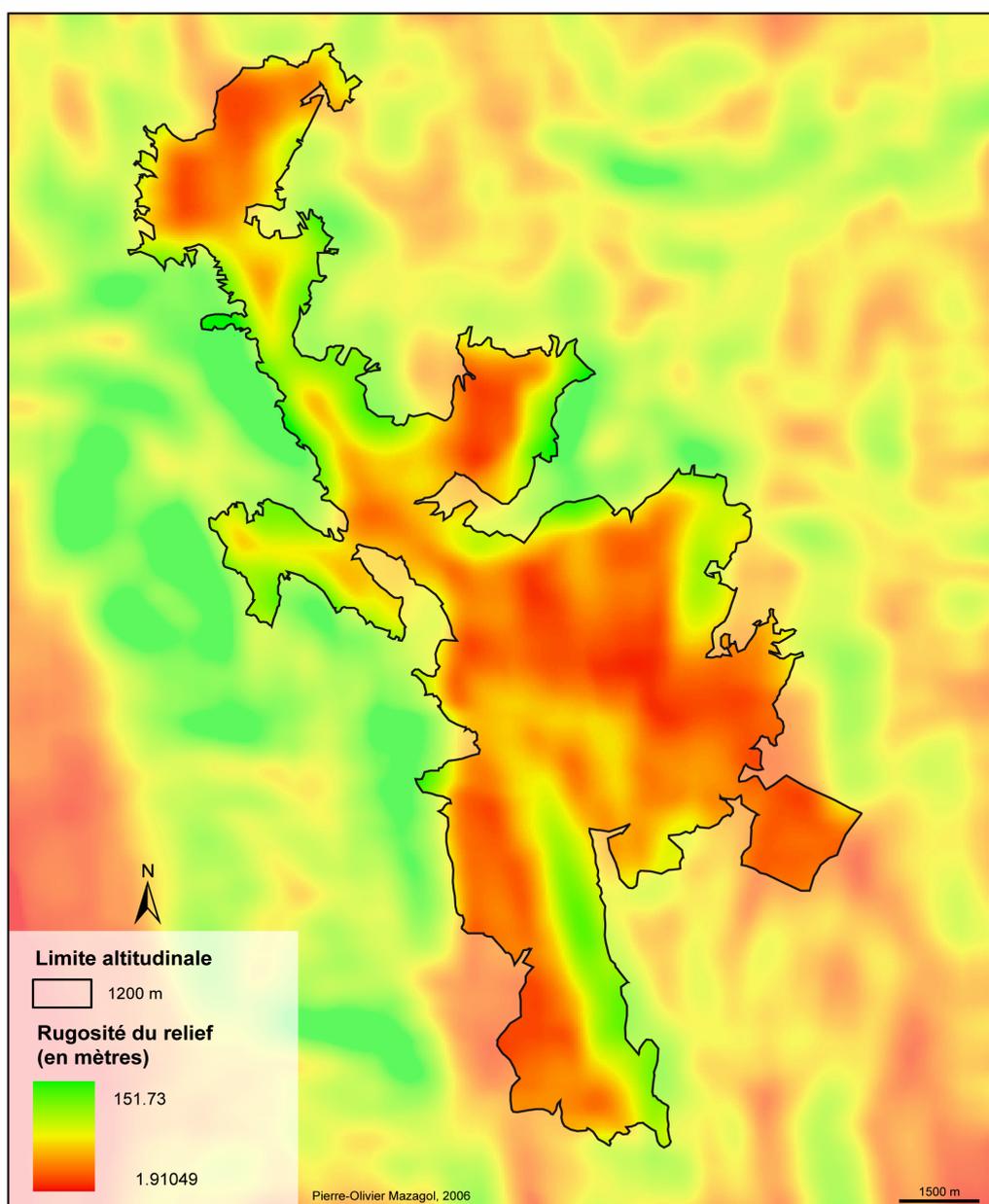
Carte 17 : Cartographie de la quantité potentielle de radiation solaire reçue (Hautes Chaumes des Monts du Forez)



Carte 18 : Cartographie de la durée d'insolation potentielle (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

- Le coefficient de rugosité du relief.

Ce dernier est évalué grâce à l'écart-type des valeurs d'altitude (voire de pente selon les auteurs) au sein de noyaux de cellules (carte 19).



*Carte 19 : Cartographie de la rugosité du relief des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 30 cellules par 30)*

Il existe un effet d'échelle inhérent au nombre de cellules pris en compte (Hörsch 2003).

Nous avons donc opté pour une évaluation de cette rugosité en considérant différentes tailles de fenêtre (noyaux de  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $9 \times 9$ ,  $20 \times 20$  et  $30 \times 30$  cellules).

$$Rugosité = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (\text{Équation 28})$$

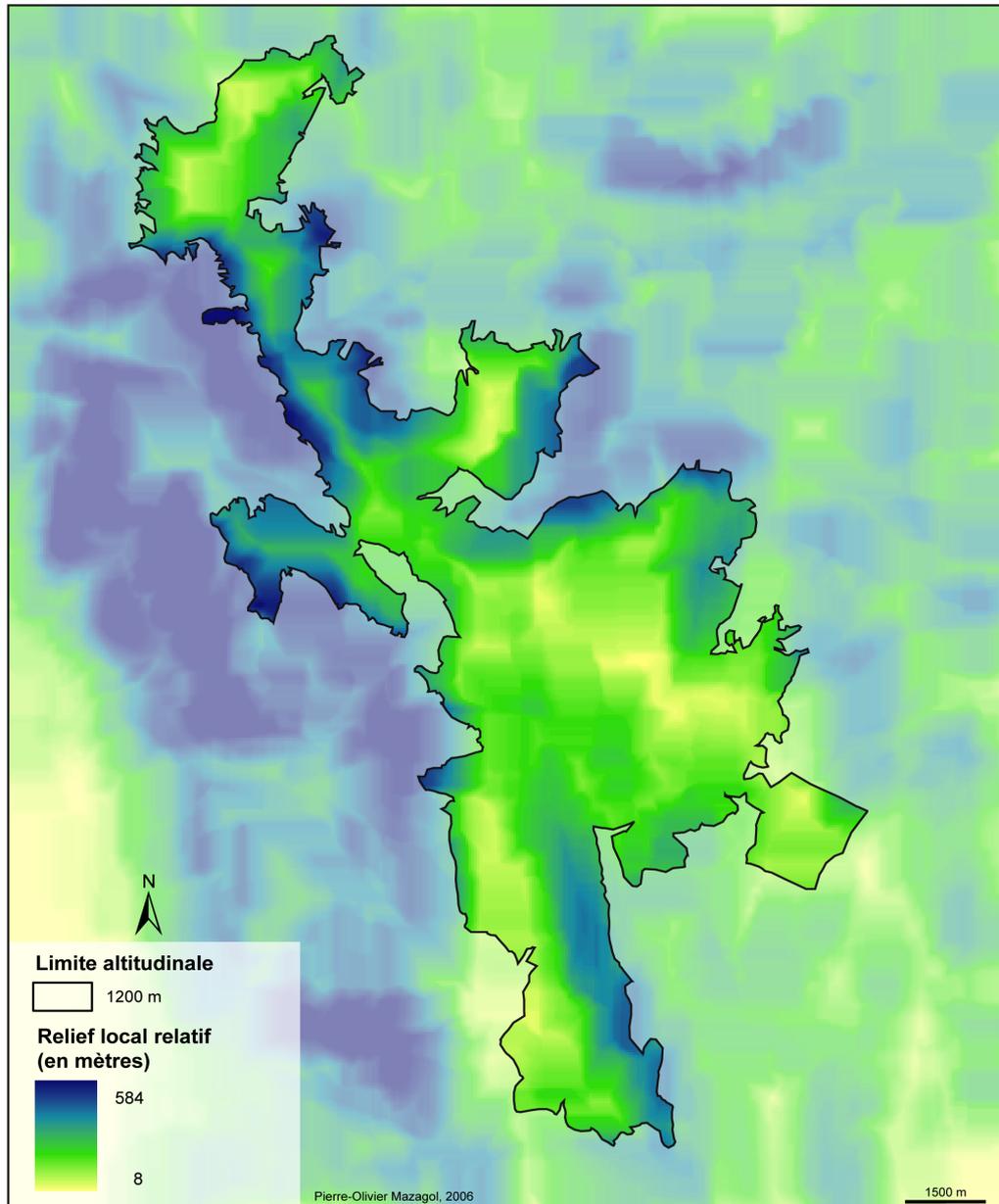
où  $n$  est le nombre de cellules considérées dans la fenêtre,  $z_i$  l'altitude de la cellule  $i$  et  $\bar{z}$  la moyenne des altitudes des  $n$  cellules de la fenêtre.

■ Le relief relatif local

Il correspond à la différence entre la plus haute et la plus faible altitude au sein d'un noyau de cellules (carte 20).

$$Rlr = z_{\max} - z_{\min} \quad (\text{Équation 29})$$

La base de données comprend la rugosité du relief pour des noyaux de cellules de  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $9 \times 9$ ,  $20 \times 20$  et  $30 \times 30$  (Brown *et al.* 1998).



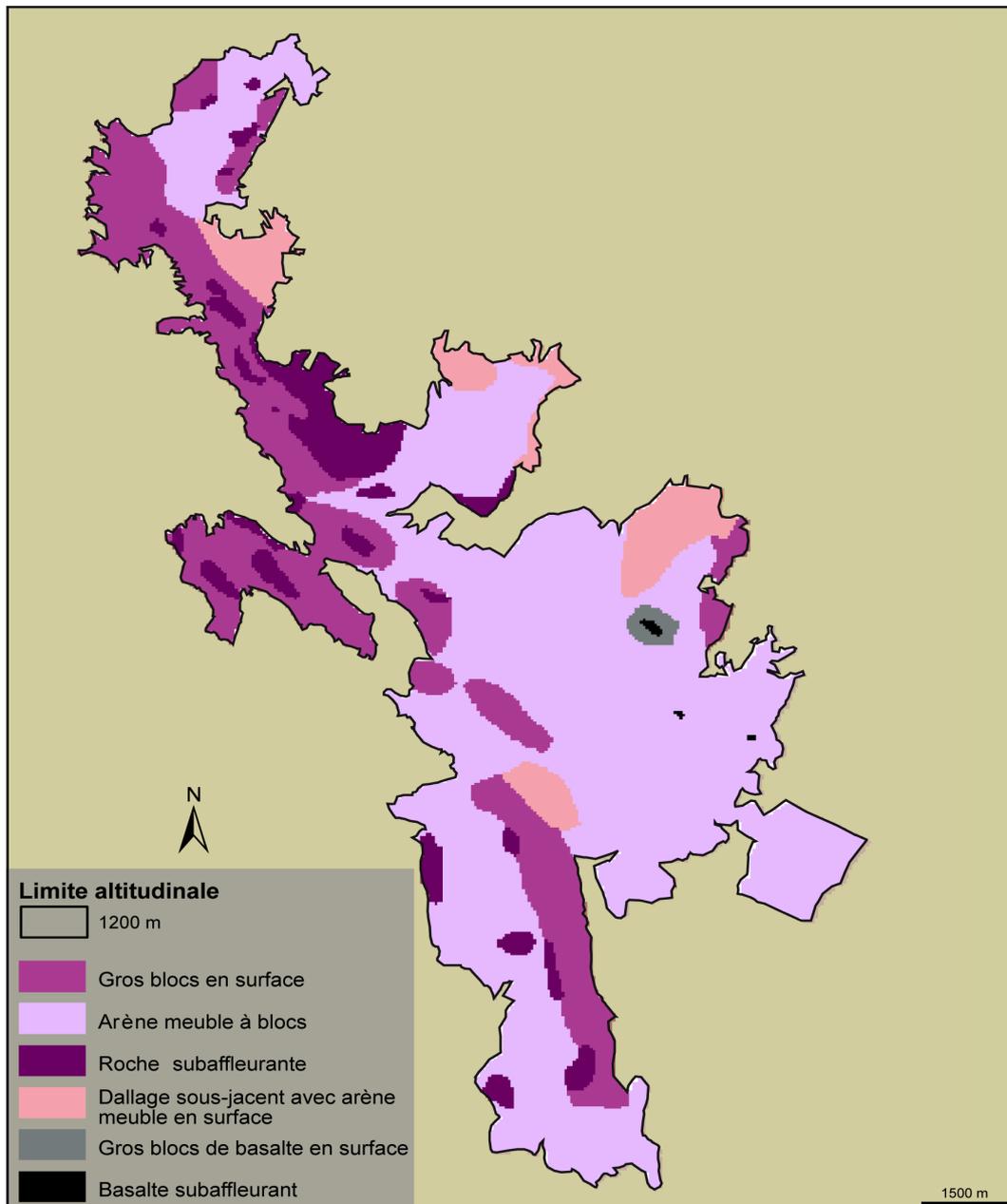
Carte 20: Cartographie du relief relatif local des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 30 cellules par 30)

c. D'autres variables physiques...

Nous avons sélectionné d'autres variables physiques qui ne sont pas obtenues à partir du M.N.T., contrairement à celles décrites précédemment.

■ Les formations superficielles

La distribution des formations superficielles est un élément déterminant pour appréhender les phénomènes d'érosion aboutissant à la formation des sols.



Carte 21 : Cartographie des formations superficielles (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

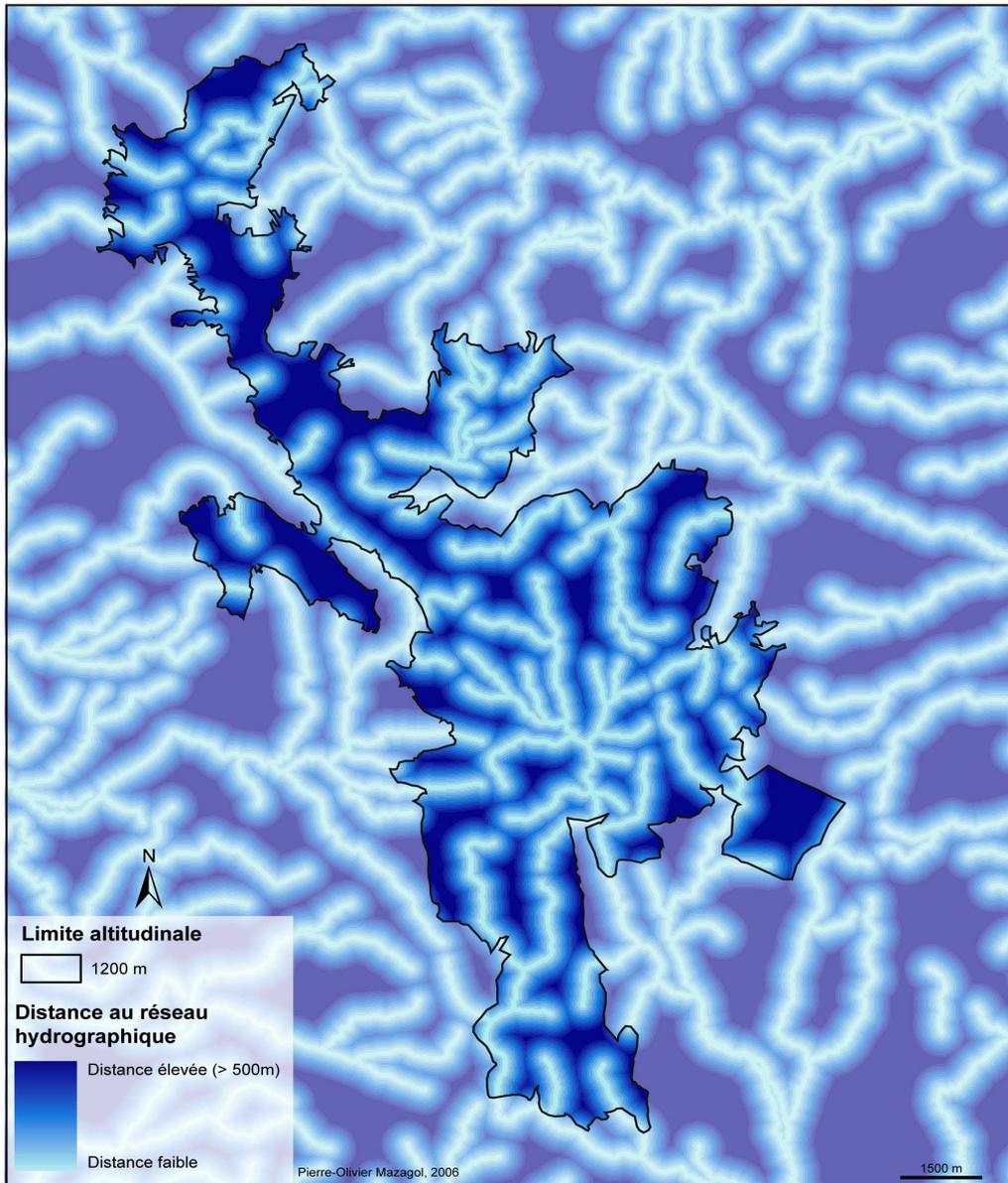
La cartographie des formations superficielles (carte 21) est issue de la thèse de Carole Bessenay (Bessenay 1995) et a été mis en place à partir de données tirées du travail de Bernard Etlicher (Etlicher 1986).

Elle permet de localiser globalement la couverture superficielle. Quatre grands types de formations superficielles y sont présents :

- Les roches granitiques subaffleurantes (tors et chicots rocheux émergeant du couvert végétal) ;
  - Les gros blocs granitiques visibles en surface (tabliers d'éboulis, arènes à blocs saillants) ;
  - Ces deux premiers présentent une déclinaison basaltique dans le secteur Est (Roche Gourgon) ;
  - Un dallage sous-jacent recouvert d'une arène meuble ;
  - Des arènes meubles à blocs non saillants.
- 
- La distance par rapport au cours d'eau le plus proche

La cartographie du réseau hydrographique est issue de la Base de Données sur la CARtographie THématique des AGences de l'Eau (Carthage) et du Ministère de l'Environnement, qui est un référentiel hydrographique national. On y trouve, entre autres, l'hydrographie linéaire (cours d'eau...).

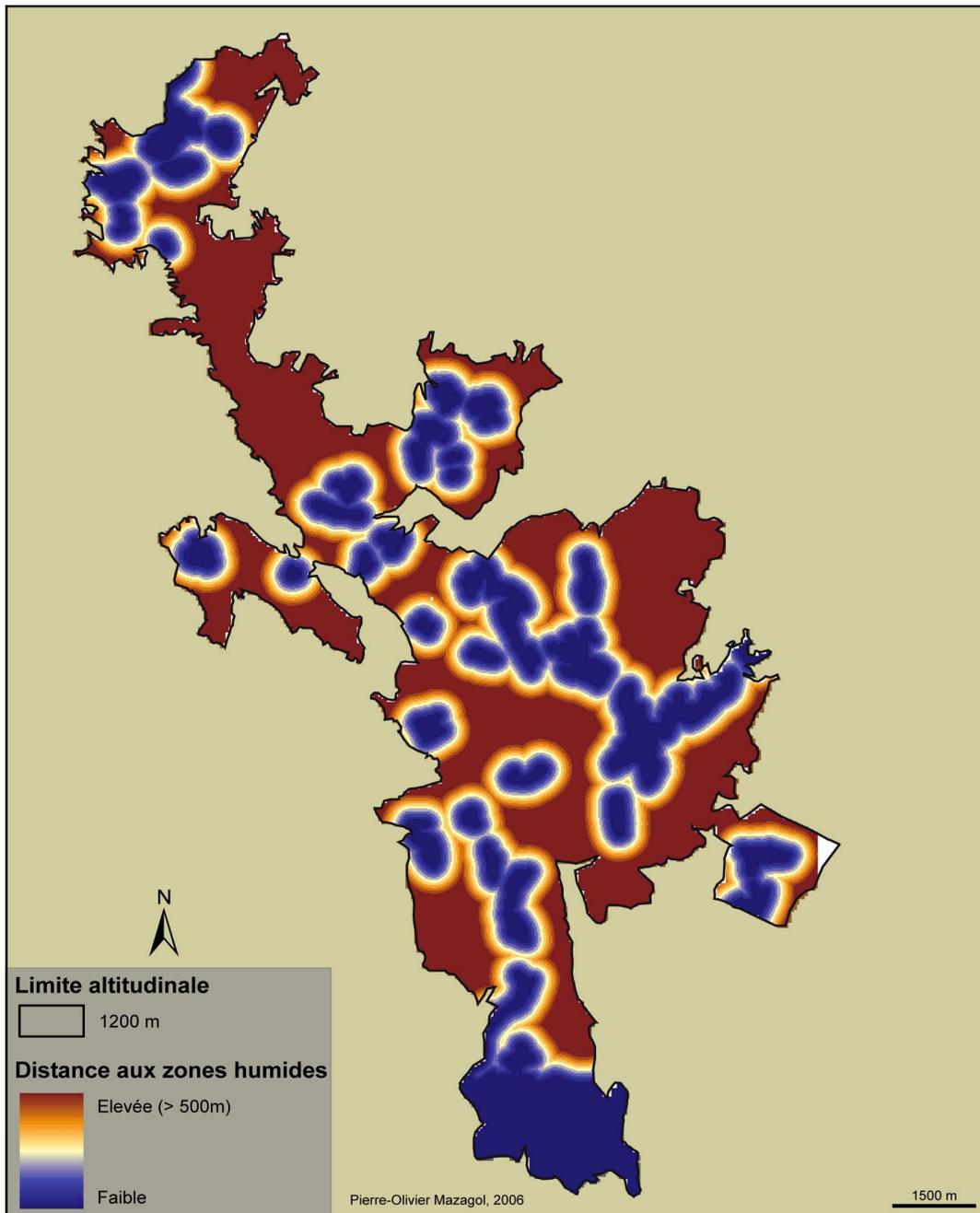
La carte 22 est obtenue par réalisation des zones tampons en anneaux concentriques autour de ces cours d'eau.



Carte 22 : Cartographie de la distance par rapport au cours d'eau le plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

- La distance par rapport à la zone humide la plus proche

Cette donnée (carte 23) est elle aussi issue de la base de données mise en place par Carole Bessenay (Bessenay 1995). Elle obtenue par réalisation des zones tampons en anneaux concentriques autour entités « zones humides ».



Carte 23 : Cartographie de la distance par rapport à la zone humide la plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

Cette variable est la combinaison de plusieurs informations dites « primaires » (Etlicher *et al.* 1993) :

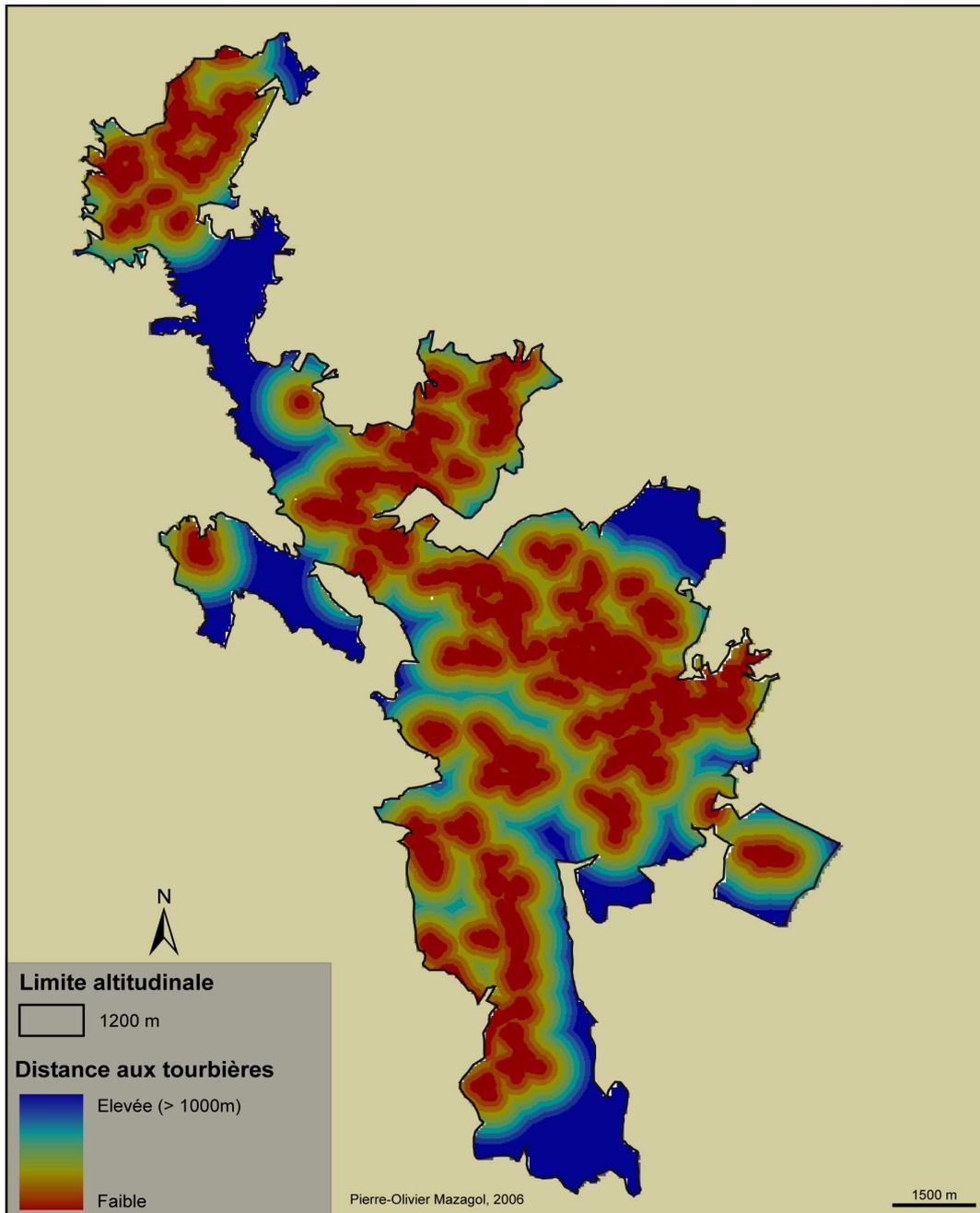
- Les zones de fusion des congères, définies d'après les informations concernant les congères moyennes pluriannuelles, au sein desquelles l'humidité est supposée importante et en tenant compte de la topographie (zone avale). La distance choisie en aval des congères est de 300 m pour correspondre à l'échelle des grandes niches de nivation et des névés. De plus, à l'intérieur de ces distances, seules les zones où la pente est inférieure à 4° ont été sélectionnées, c'est-à-dire les zones où l'écoulement n'est pas favorisé ;
- Les fonds de vallées, soit une distance de 100 m de part et d'autre des cours d'eau, où la pente est égale ou inférieure à 4° ;
- Les zones tourbeuses.

■ La distance aux tourbières

Nous avons choisi de compléter cette information en prenant en compte une cartographie plus récente et plus complète de la distribution des tourbières.

Les Hautes Chaumes abritent en effet un nombre important de tourbières qui, en raison de leur fonctionnement, sont autant de sources d'eau. De plus, il a été démontré que leur répartition est soumise à de nombreux facteurs, à la fois physiques et anthropiques (Cubizolle (à paraître)).

La prise en compte de la distance à ces milieux particuliers au sein des Hautes Chaumes (carte 24) nous est apparue comme pouvant avoir un sens dans le cadre de notre recherche. Elle obtenue par réalisation des zones tampons en anneaux concentriques autour de ces tourbières. La carte de localisation des tourbières est issue du travail de Jérôme Porteret (Porteret 2001) étendue, en 2004, à l'ensemble des Hautes Chaumes.

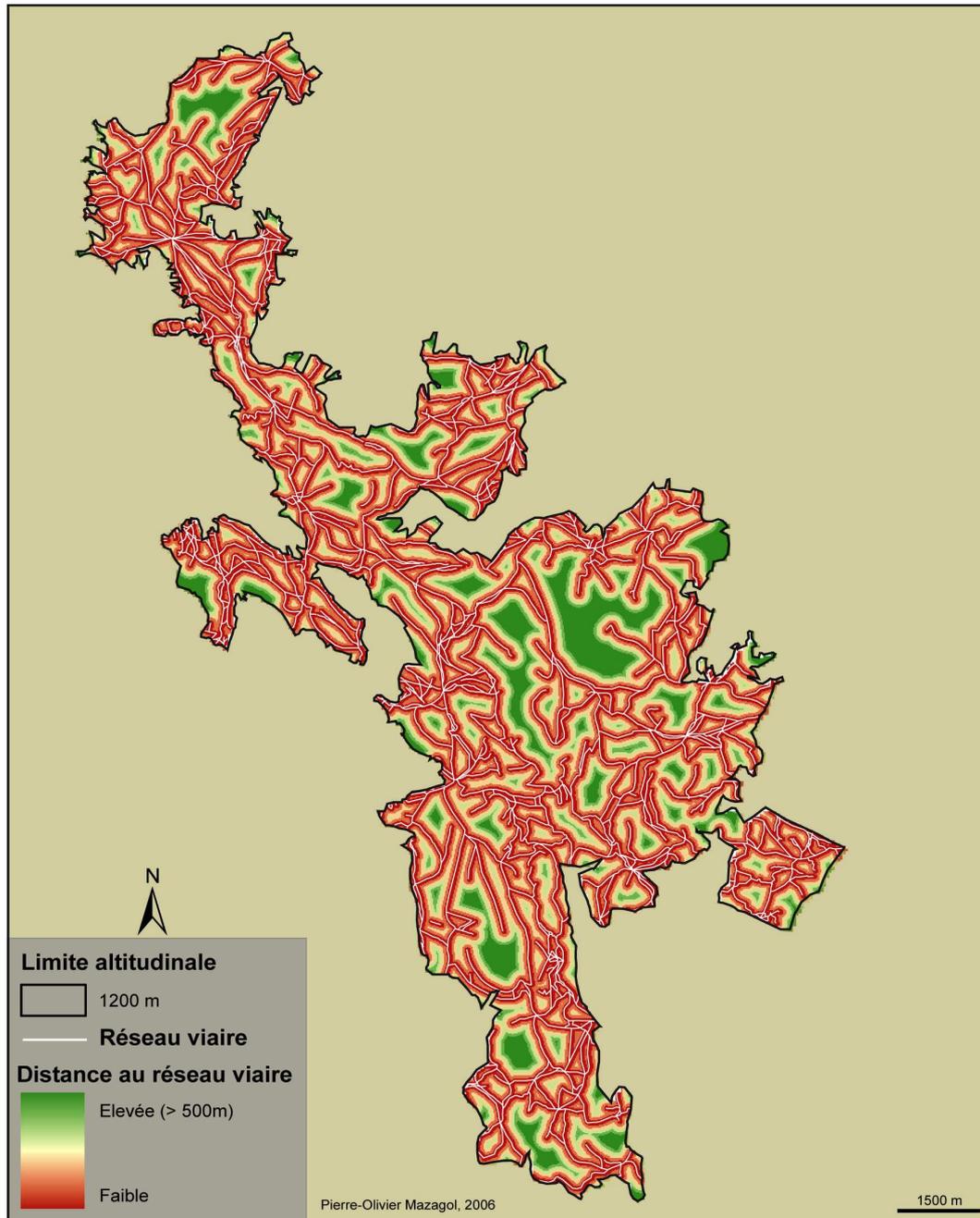


Carte 24 : Cartographie de la distance par rapport aux tourbières (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

d. ... et des variables anthropiques.

Nous avons également considéré différentes variables anthropiques.

- La distance par rapport au chemin le plus proche



Carte 25 : Cartographie de la distance par rapport au chemin le plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

Différents types de voies d'accès ont été définis lors de la mise en place de la base de données sur le réseau viaire (routes goudronnées, chemins empierrés, sentiers).

Nous les avons considérés comme un ensemble, sans distinction typologique particulière.

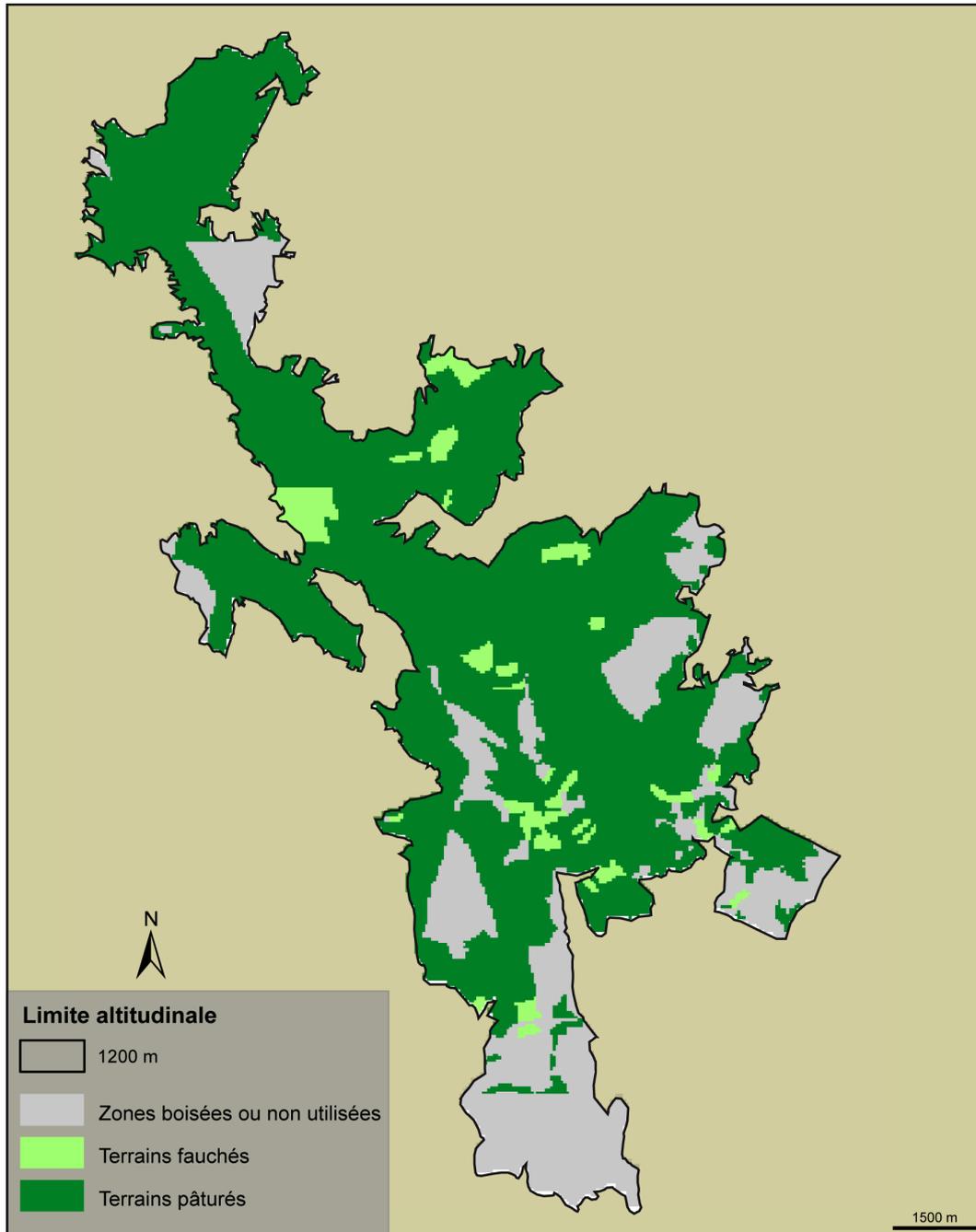
La cartographie (carte 25) utilisée est issue de la thèse de Carole Bessenay (Bessenay 1995) et a été obtenue par réalisation des zones tampons en anneaux concentriques autour de ces chemins.

- L'utilisation pastorale

Les cartographies utilisées sont également issues de la thèse de Carole Bessenay (Bessenay 1995). Elles ont été réalisées à partir des données recueillies par Jean-Paul Couhert (Couhert 1988).

Quatre catégories d'informations, matérialisées par autant de compositions cartographiques (Etlicher *et al.* 1993), sont à notre disposition. On distingue ainsi :

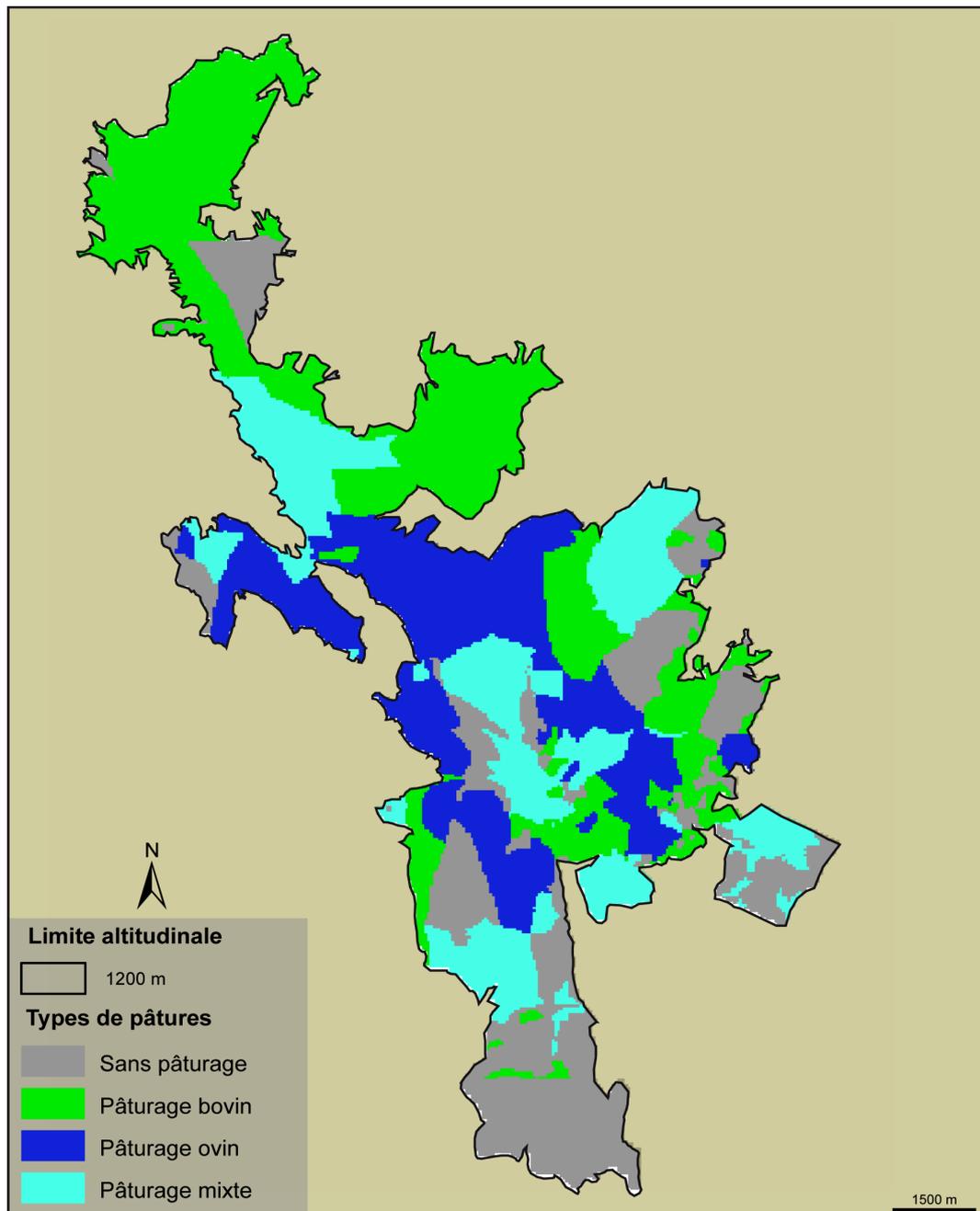
○ *L'exploitation des surfaces*



*Carte 26 : Cartographie de la distribution des terrains boisés, fauchés et pâturés (Hautes Chaumes des Monts du Forez)*

○ *La fréquentation animale*

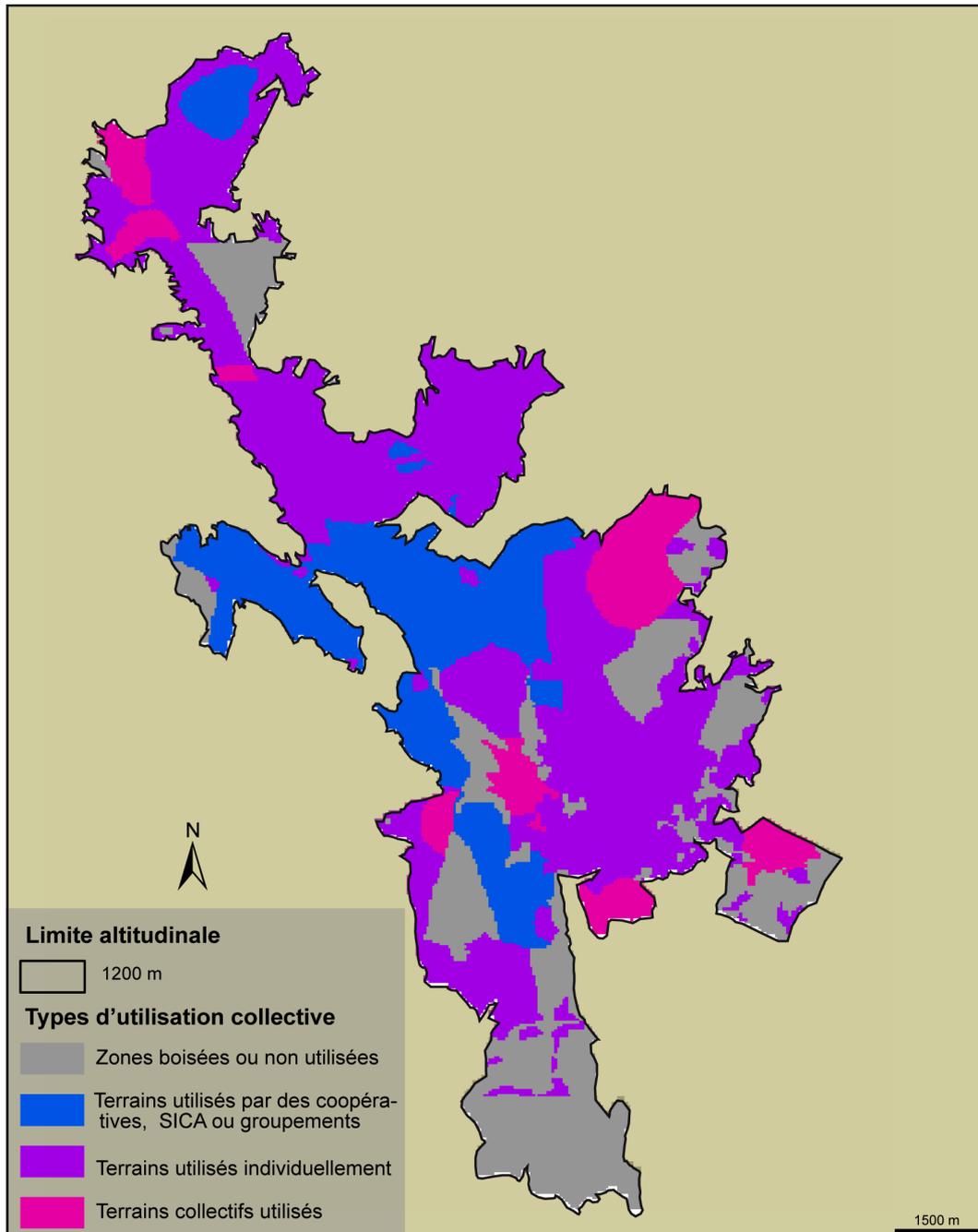
Trois types de pâturage sont pratiqués sur les Hautes Chaumes : ovin, bovin ou mixte.



Carte 27 : Distribution des parcelles en fonction du type de pâturage exercé (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

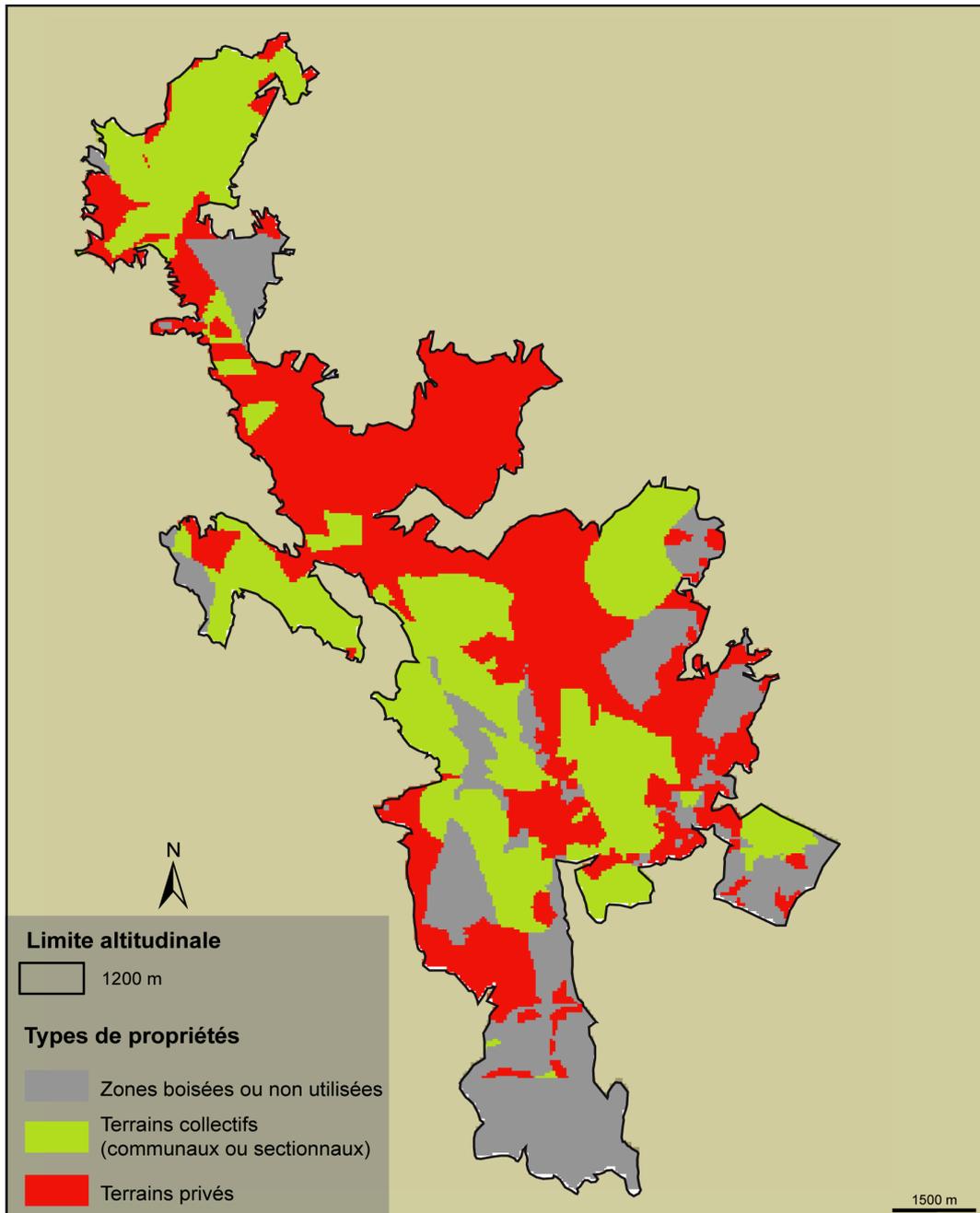
○ *L'utilisation proprement dite*

Celle-ci peut être collective, individuelle ou encore mixte, terrains collectifs utilisés par plusieurs agriculteurs de façon tout à fait individuelle.



Carte 28 : Distribution des parcelles en fonction de leur mode d'utilisation (Hautes Chaumes des Monts du Forez)

○ *Le parcellaire*



*Carte 29 : Distribution des parcelles en fonction du type d'utilisation (Hautes Chaumes des Monts du Forez)*

Le parcellaire est constitué soit de terrains collectifs (communaux ou sectionnaux), soit de terrains appartenant à des particuliers.

Ainsi, que ce soit par calcul ou simple récupération, nous avons acquis un total de 55 variables dont nous estimons l'influence importante au sein de notre terrain d'étude. Cependant, il est nécessaire à présent de s'interroger sur ces dernières : quelle est leur précision ? Reflètent-elles la réalité du terrain ?

## Chapitre 4 : Évaluation critique des données mobilisées

Il est en effet indispensable de s'interroger sur la précision et la validité des données que nous avons utilisées et plus particulièrement, sur la végétation et les principaux indices morphométriques.

D'une part, la végétation, obtenues à partir d'une image satellite, doit faire l'objet d'un regard critique.

Quant aux variables se rapportant à la topographie, elles ont été utilisées pour deux raisons essentielles :

- Elles ont déjà, dans leur majorité, été éprouvées dans d'autres travaux ;
- La nature des données premières (MNT, hydrologie) facilite leur acquisition pour la plupart des terrains d'études potentiels.

Cependant, les indices dérivés du modèle numérique de terrain sont estimés selon l'application de formules mathématiques sur différents voisinages de cellules. Nous avons cherché à caractériser plus précisément les variables liées à la topographie de manière à mieux comprendre leurs différentes implications en fonction de la résolution.

Plus simplement, nous avons tenté de déterminer à quel degré ces indices reflètent la réalité du terrain selon les conditions considérées. Mais nous nous sommes également intéressés à l'information portée par d'autres données, en particulier celles ayant trait à l'activité pastorale.

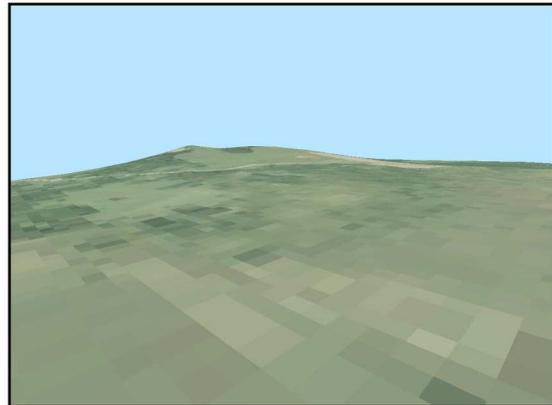
### 4.1 Choix d'un site test

Le secteur choisi correspond secteur de la Roche Gourgon, localisé dans la zone de travail initial. Cette zone tourbeuse occupe la tête du bassin du Chorsin dans un vaste amphithéâtre modelé par la glace lors des dernières glaciations.

Au nord-est de la zone, on trouve une croupe d'origine volcanique (volcanisme syn-rift). Plutôt que de travailler sur la totalité de ce secteur, nous avons sélectionné cet élément géomorphologique de forme caractéristique. Elle présente l'intérêt de présenter deux sommets importants, plus un troisième plus modeste. Nous sommes donc en présence d'un relief important auquel se superposent des micro-reliefs.



La Roche Gourgon (vue sud-ouest)  
(photo : Jérôme Porteret)



Visualisation 3D de la Roche Gourgon  
(à partir du MNT de résolution 10 m)



La Roche Gourgon (vue ouest-sud-ouest)  
(photo : Jérôme Porteret)



La Roche Gourgon (vue sud-sud-ouest)  
(photo : Pierre-Olivier Mazagol)

*Figure 16 : Photographies de la Roche Gourgon et représentation en 3D*

Il est à noter que, pour chaque variable étudiée ci-dessous, plutôt que de présenter toutes les résolutions, nous avons sélectionné la plus forte (20 m) et la plus faible (100 m), ainsi que la résolution intermédiaire (50m : correspondant à la résolution de la données source, à savoir le MNT IGN).

Nous avons procédé à plusieurs comparaisons entre le relief de référence et les résultats obtenus aux différentes résolutions. Ces comparaisons concernent notamment

l'occupation du sol, l'altitude, l'exposition, la pente, les courbures, le relief relatif local et la rugosité.

## 4.2 Mise en place d'un modèle numérique de terrain à l'échelle locale

Nous avons mis en place un modèle numérique de terrain, bien plus précis que celui utilisé pour la construction des bases de données Pegase, de manière à reproduire le plus possible la topographie locale.

Il est important, à ce niveau, de préciser que son rôle n'est pas de subir une nouvelle fois l'application des algorithmes d'analyse de terrain. Il servira simplement de référence et de base à la visualisation en 3 dimensions du terrain d'étude en association avec les observations de terrain.

Sa conception a été réalisée à partir des courbes de niveaux de la carte IGN à 1/25 000<sup>ème</sup> mais également d'un certain nombre de points de référence altimétrique mesurés sur le terrain.

L'interpolation utilisée est la fonction « Topo to raster » du logiciel ESRI ArcGis-ArcInfo 9.x, extensions « Spatial Analyst » et « 3D Analyst ». Il s'agit de l'interpolation d'une surface hydrologiquement correcte à partir de points, lignes et polygones.

Plus précisément, il s'agit d'une méthode d'interpolation spécifiquement conçue pour la création des modèles numériques de terrains hydrologiquement corrects. Elle est basée sur le programme d'ANUDEM 4.6.3. développé par Michael Hutchinson (Hutchinson 1988 ; Hutchinson 1989 ; Hutchinson 1993 ; Hutchinson et Dowling 1991). L'intérêt de ce modèle est de pouvoir spécifier le réseau hydrographique, les lacs, les dépressions et de pouvoir intégrer à la fois, ou indépendamment, des données au format points ou lignes. Le MNT est construit par itérations successives avec une technique d'interpolation de type spline permettant des changements rapides de morphologie.

Ainsi, différents types de données peuvent être entrés simultanément : des points d'élévation, des courbes de niveau, des cours d'eau, des points représentant des dépressions topographiques connues, l'emplacement d'éventuels lacs.

Un nombre important de paramètres peuvent être fournis de manière facultative :

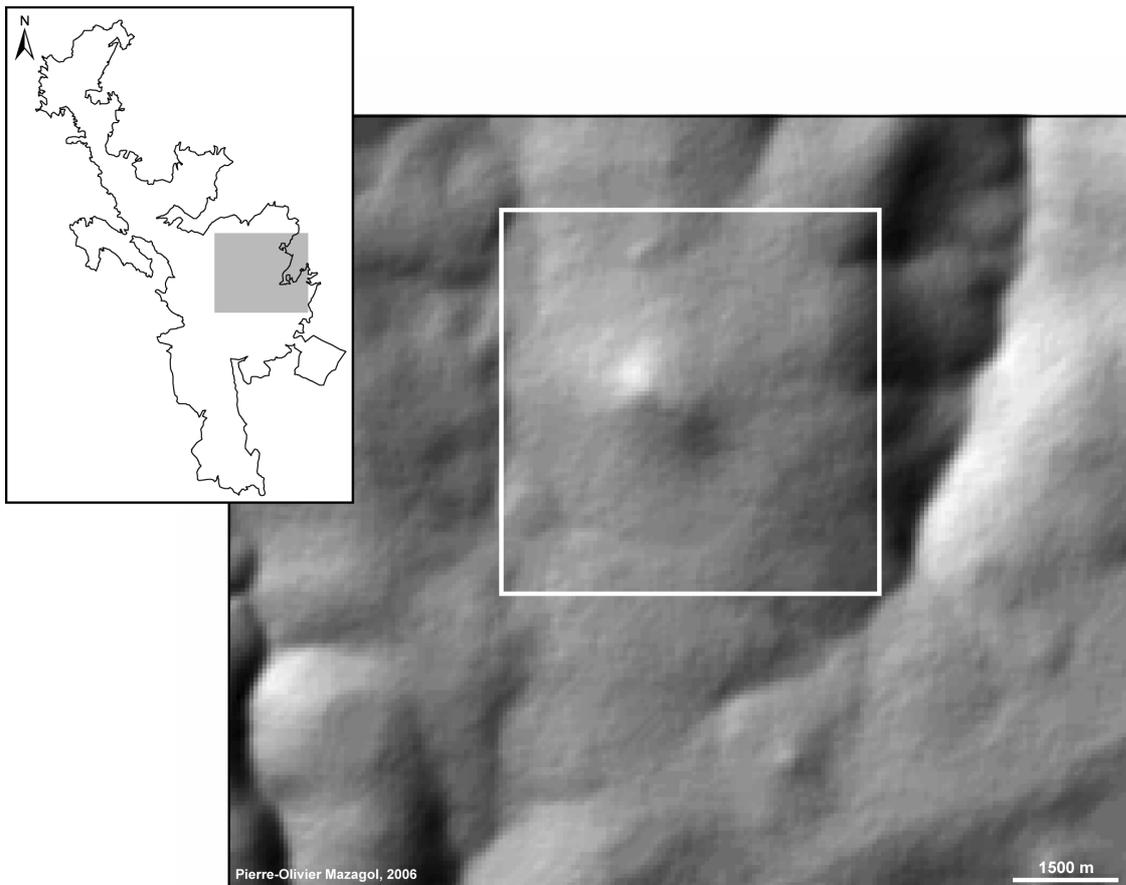
- La marge dans les cellules est la distance dans les cellules à interpoler au-delà de l'étendue et de la limite en sortie spécifiée (valeur par défaut : 20) ;
- La plus petite valeur  $z$  (altitude) à utiliser pour l'interpolation (par défaut, 20% en dessous de la plus faible de toutes les valeurs entrées) ;
- La plus grande valeur  $z$  à utiliser pour l'interpolation (par défaut, 20% en dessus de la plus forte de toutes les valeurs entrées) ;
- Le type de drainage à appliquer. On peut définir l'option de drainage pour tenter de supprimer (ou non) toutes les cuvettes ou dépressions, afin de générer un MNT hydrologiquement correct (sauf si ces dépressions ont été indiquées en entrée). Ce point est important puisque pouvant poser problème lorsque le milieu étudié comporte réellement des cuvettes ;
- Le type de données d'altitude dominant en entrée (contour ou spot) ;
- Le nombre maximal d'itérations d'interpolation (valeur par défaut : 40) ;
- Une pénalité de rugosité, second terme de la dérivée au carré intégré en tant que mesure de la rugosité (valeur par défaut : 0 pour des données de type contour, 0,5 pour des données de type spot). L'éditeur conseille d'utiliser des données plus élevées ;
- Un facteur d'erreur de discrétisation permettant d'ajuster le degré de lissage lors de la conversion des données en entrée en raster. L'ajustement standard est compris entre 0,5 et 2 (valeur par défaut : 1). Une valeur inférieure entraîne un lissage moins important et une valeur supérieure un lissage plus important ;

- Une erreur verticale standard correspondant à la quantité d’erreurs aléatoires dans les valeurs z des données en entrée. La valeur par défaut est 0. Cette erreur peut être définie par l’écart type des erreurs (en cas de données présentant des erreurs verticales significatives avec une variance uniforme) ;
- Deux tolérances
  - Tolérance 1 : reflétant la précision et la densité des points d’altitude par rapport au drainage de surface (valeur par défaut : 2,5 pour des données de type contour, 0 pour des données de type spot). L’éditeur préconise l’erreur standard ( $=\frac{\text{écart} - \text{type}}{\sqrt{n}}$ ) des hauteurs pour des données de type ponctuel et la moyenne des isolignes pour des données de type isoligne,
  - Tolérance 2 : évitant tout problème lié à des hauteurs de barrières inappropriées (valeur par défaut : 100 pour des données de type contour, 200 pour des données de type spot).

Les valeurs utilisées pour notre test :

Données en entrée :	Courbes de niveau + points côtés + réseau hydro
Marge dans la cellule :	Par défaut
Plus petite valeur z :	Par défaut
Plus grande valeur z :	1482
Drainage :	Par défaut (Enforce)
Type principal :	Contour
Nombre maximal d’itérations :	Par défaut
Pénalité de rugosité :	2
Facteur d’erreur :	2
Erreur verticale :	0
Tolérance 1 :	5
Tolérance 2 :	Par défaut

Tableau 2 : Récapitulatif des options choisies pour l’interpolation du MNT « Roche Gourgon » avec la fonction « Topo to raster »



*Carte 30 : Localisation du secteur de la Roche Gourgon (Hautes Chaumes des Monts du Forez)*

Le fichier résultant est un raster de résolution 10 m.

Afin, de supprimer les artefacts liés aux données sources, nous avons appliqué, dans ArcGis, un lissage du modèle brut (par noyau circulaire de points de rayon 10 cellules). Un tel lissage ne devrait pas affecter le calcul des deux principales transformations réalisées sur le MNT : relation spatiale et altitudinale (Ansoult 1988).

### 4.3 La végétation

Deux aspects peuvent être discutés au sujet de la cartographie de la végétation : la qualité des informations qui y sont reportées et l'effet de la variation de la résolution.

### 4.3.1 Étude de la classification

La carte de la végétation (Jacqueminet *et al.* 2002) a été réalisée à partir d'images satellitales SPOT XS (du 11/09/1997 et 06/07/1998, acquises dans le cadre du programme ParkView) dont l'information dans le proche infrarouge a permis de discriminer de manière précise les couverts végétaux. De haute résolution (20 mètres), ces images restituent dans le détail, la diversité des formations végétales et leurs différents stades d'évolution face au processus de colonisation des ligneux. Enfin, la périodicité des images a permis de suivre l'évolution du secteur (Jacqueminet *et al.* 2002).

La méthode adoptée pour la discrimination des formations végétales sur les images satellitales a consisté en une interprétation *a posteriori* des résultats de traitements statistiques par comparaison avec des observations de terrain et des photographies aériennes. Cette mise en relation constante image-terrain a souligné l'importance des paramètres liés à la physiologie du couvert dans la réponse spectrale de la végétation. Des classifications automatiques (méthode des nuées dynamiques) ont été réalisées en variant le nombre de classes à chaque essai, seules les classes ayant une signification thématique reconnue sur le terrain étant retenues. L'image résultante est un réassemblage des classes issues des différents essais de classification. L'application d'un filtre de lissage a permis d'homogénéiser le résultat (Jacqueminet *et al.* 2002).

La pertinence de la classification obtenue est donc soumise à divers facteurs parmi lesquels :

- La variabilité de la réponse spectrale en fonction :
  - des caractéristiques des formations observées,
  - du moment où est réalisée l'observation (terrains fauchés, labourés...)
- La mise en relation entre les résultats du traitement et la validation par le travail de terrain ;
- Une certaine subjectivité de la part du réalisateur de la cartographie.

D'autre part, il est nécessaire de s'interroger sur l'existence d'une relation entre physiologie et paramètres écologiques.

Parmi les classes de végétation, deux nous ont semblé devoir être examinées plus particulièrement : les « fumades » et les « sols nus ». Nous avons extrait ces deux classes du fichier d'origine et, après vectorisation, les avons superposées à des photos aériennes datant de 1999.

Il est bien évident que les résolutions de ces deux types de documents ne sont pas comparables. Elle est de 1 mètre pour les photos aériennes contre 20 m pour les images satellites. Un certain nombre d'imprécisions inhérentes à la méthode de mise en place de ce type de cartographie, peuvent donc être observées.

Mais nous avons tout de même relevé quelques points importants :

- Les cellules identifiées comme « fumades » correspondent en général bien à cette classe. Cependant, de nombreuses « fumades » apparaissent comme « herbacées », voire comme « forêts ». Ces erreurs s'expliquent par leur utilisation. Certaines sont fauchés, d'autres ont fait l'objet de reboisement. Rappelons que les fumades sont des prairies fumées, c'est à dire ayant reçu les eaux de nettoyage du sol des étables, riches en azote. De plus, cette utilisation en fond plus un « usage » qu'une formation végétale ;
- Les sols nus s'avèrent être une classe très hétérogène regroupant des zones fortement érodées, des chemins, des parcelles fraîchement fauchées ou labourées, plus rarement des zones de coupe. De plus, les cellules correspondantes sont souvent isolées.

Plus généralement, il est évident que la légitimité de la cartographie dépend étroitement de l'échelle à laquelle elle est considérée. Ces différentes constatations sont des éléments importants et seront prises en compte dans la partie traitement de notre recherche.

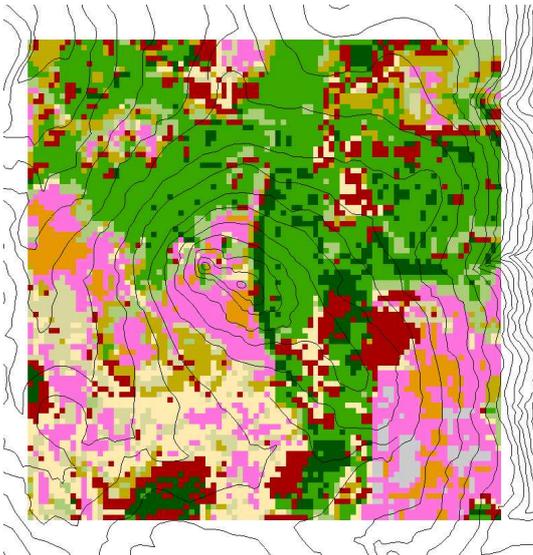
### 4.3.2 Effet de la variation de la résolution

Nous avons dans un premier temps comparé l'occupation du sol aux différentes résolutions. Nous précisons que la résolution 20 m correspond à la résolution d'origine de cette donnée.

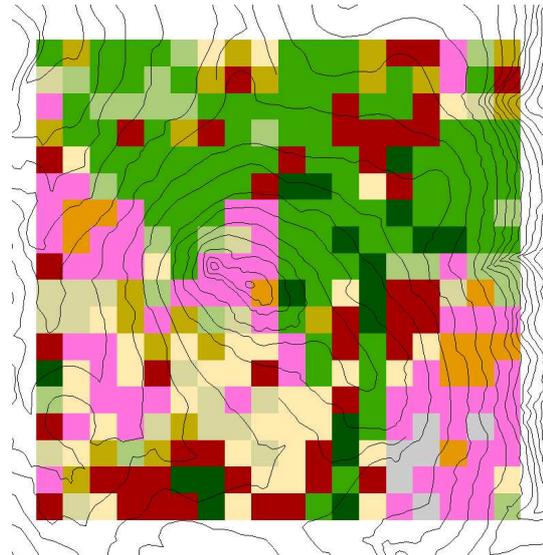
L'observation des occupations du sol de ces deux zones à des résolutions extrêmes montre à quel point cette résolution provoque une modification de l'information (figure 19). Il semble évident, aux fortes résolutions, que la topographie locale joue un rôle majeur dans la distribution de la végétation (figure 17).

Deux éléments, dans l'organisation du paysage, semblent être inhérents à la topographie :

- un étagement en fonction de l'altitude
- un effet de protection induit par la roche Gourgon et faisant que sa face ouest est occupée par des herbacées et contrairement à sa face est.



*Figure 17: Occupation du sol de la zone Roche Gourgon (résolution 20 m) avec superposition des courbes de niveau*



*Figure 18: Occupation du sol de la zone Roche Gourgon (résolution 100 m) avec superposition des courbes de niveau*

Si, aux résolutions les plus faibles, nous avons noté une perte significative d'information, liée au changement d'échelle, on devine encore une certaine correspondance, entre la distribution de l'occupation du sol et les courbes de niveau (figure 18). Néanmoins, cette correspondance reste relative.

Cependant, lors de la mise en place des bases de données Pegase, le changement de résolution affecte également les autres données et notamment l'altitude. Nous avons donc cherché à mieux cerner l'influence du changement de résolution sur l'expression des formes caractéristiques du relief pouvant jouer un rôle dans les phénomènes que nous cherchions à caractériser.

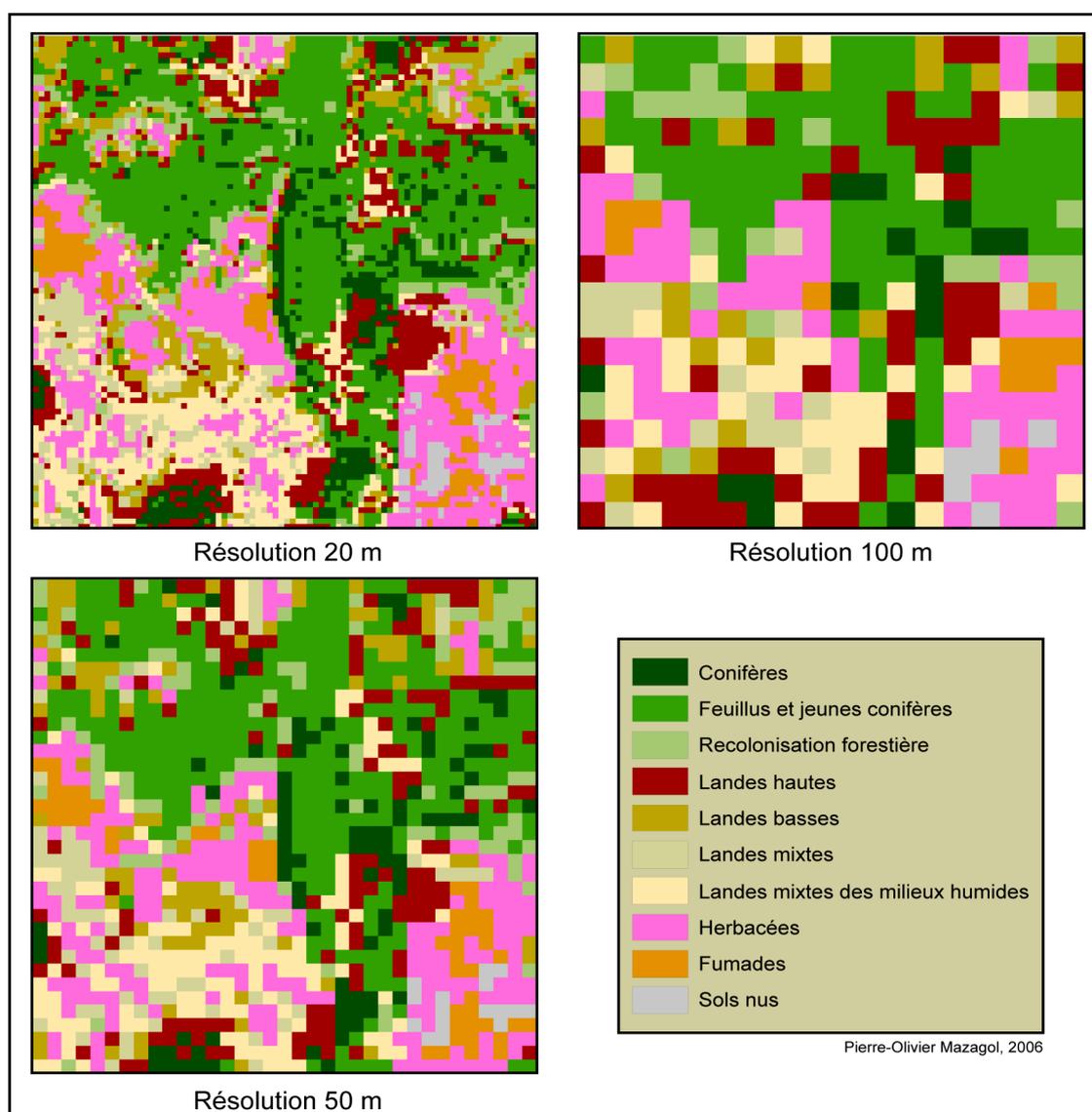


Figure 19 : Occupation du sol de la zone Roche Gourgon à différentes résolutions

## 4.4 Les principaux indices morphométriques

### 4.4.1 L'altitude

Nous avons comparé des différents fichiers que nous avons obtenus par changement de résolution à partir du modèle numérique de terrain IGN à 50 m. Nous remarquons aisément qu'une diminution de la résolution entraîne une perte d'information qui se traduit par le gommage des micro-reliefs (figure 20).

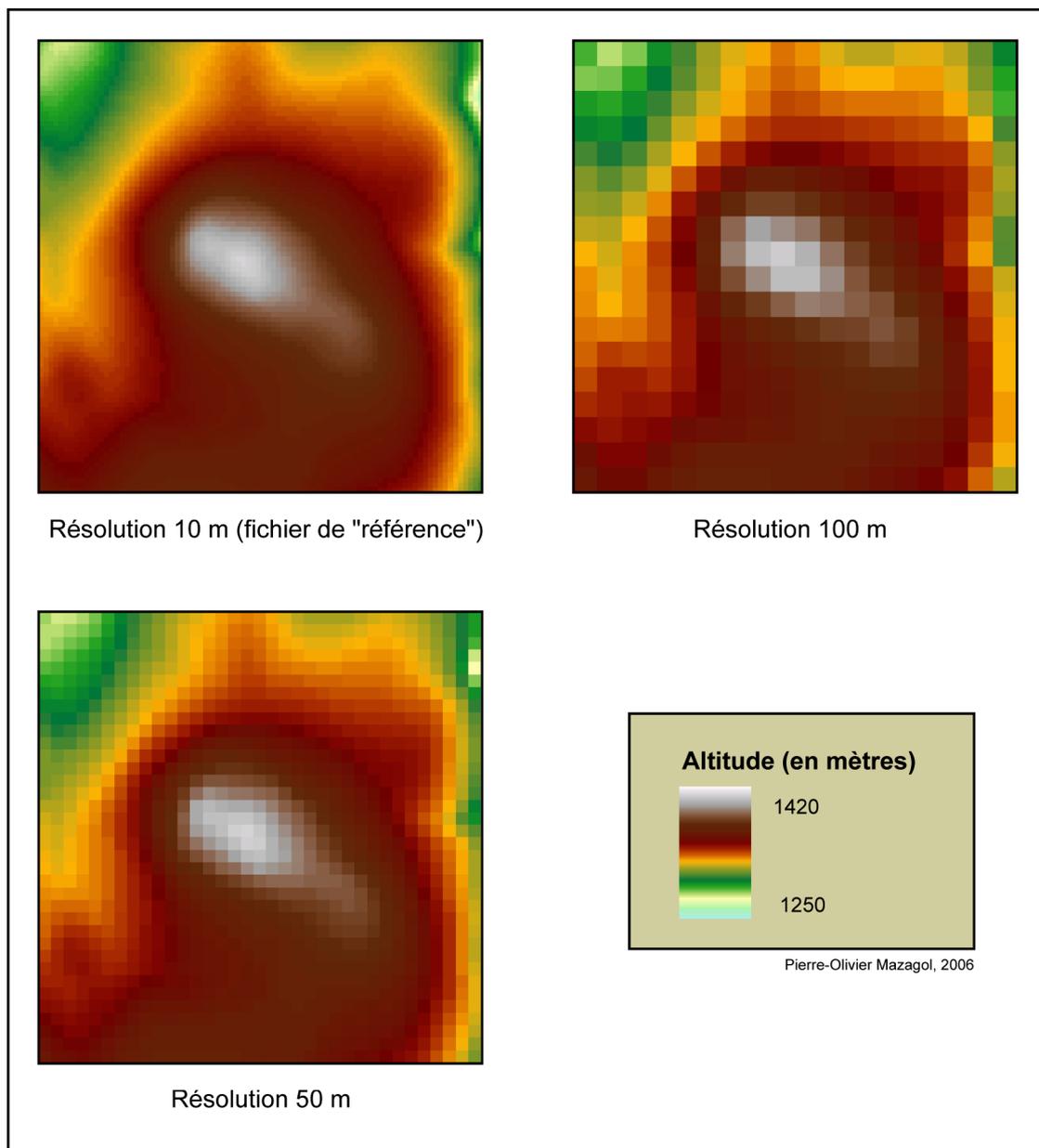


Figure 20 : M.N.T. de la zone « Roche Gourgon » à différentes résolutions

Ainsi, les deux sommets de la Roche, nettement perceptibles à partir du fichier de référence disparaissent partiellement à la résolution 20 m et totalement aux résolutions plus faibles. Cette perte d'information se caractérise par une diminution de l'altitude du point culminant (figure 20).

Outre cette perte d'information (aspect quantitatif), nous pouvons nous interroger sur une éventuelle dégradation de cette dernière (aspect qualitatif). Pour cela, nous avons extrait les isohypses des fichiers (M.N.T. I.G.N.) et les avons superposées (figure 21).

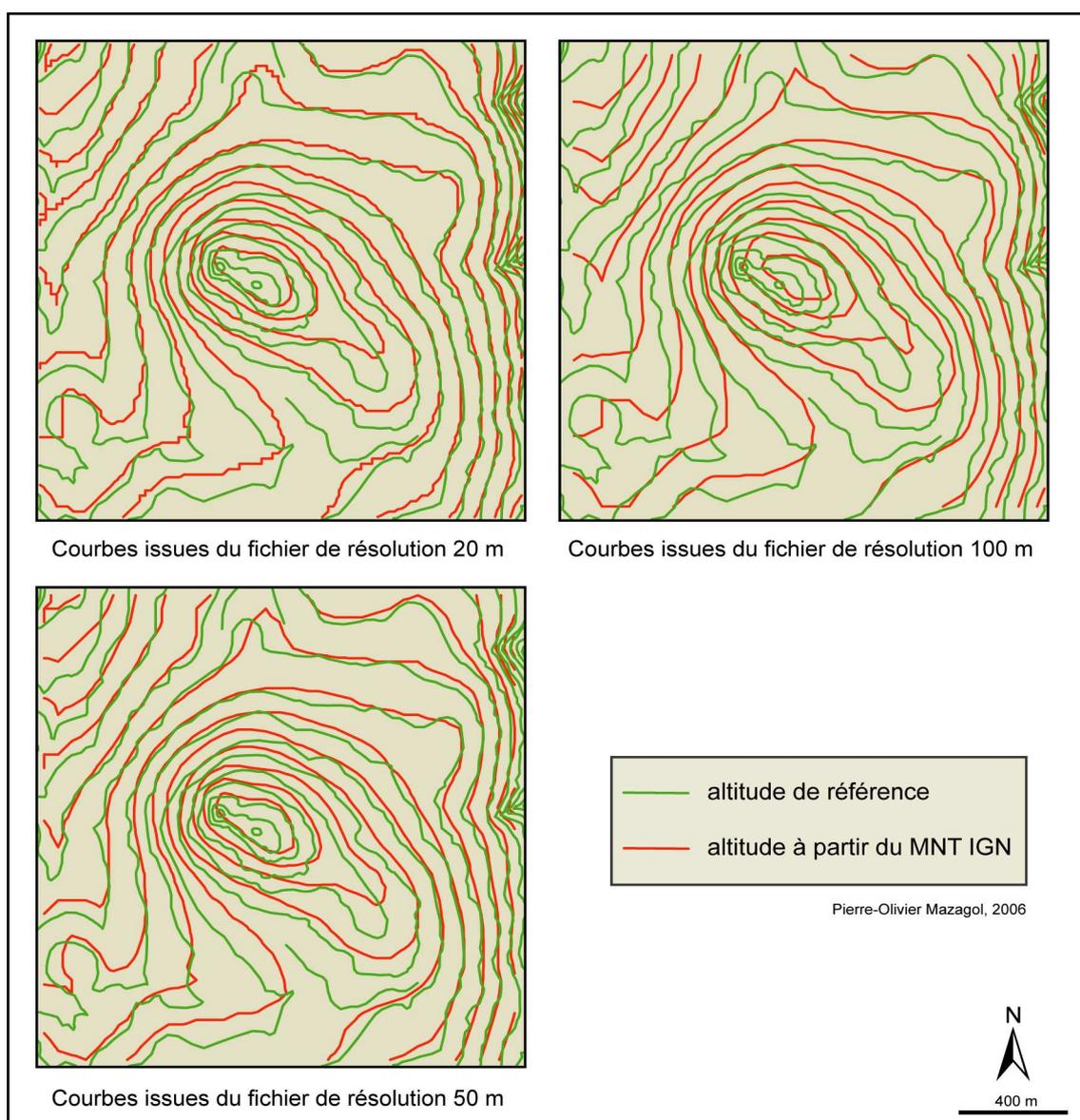


Figure 21 : Effet de la résolution sur la précision du MNT

L'observation de ces trois cartes permet de mettre en évidence certaines imprécisions au sein du MNT. Ces erreurs ne sont pas significativement aggravées par une augmentation de la résolution, ce qui n'est pas le cas lors de la diminution de cette dernière, notamment pour la zone sommitale de la Roche Gourgon.

D'autre part, elles sont minimales dans le cadre des zones à pente régulière. En revanche, elles sont plus marquées au niveau des grandes étendues de faible amplitude et au niveau des talwegs. Il ne faut cependant pas perdre de vue que le MNT IGN à une résolution d'origine de 50 m, ce qui induit l'existence d'un lissage non négligeable qui ne peut que produire des imprécisions en comparaison à la réalité du terrain.

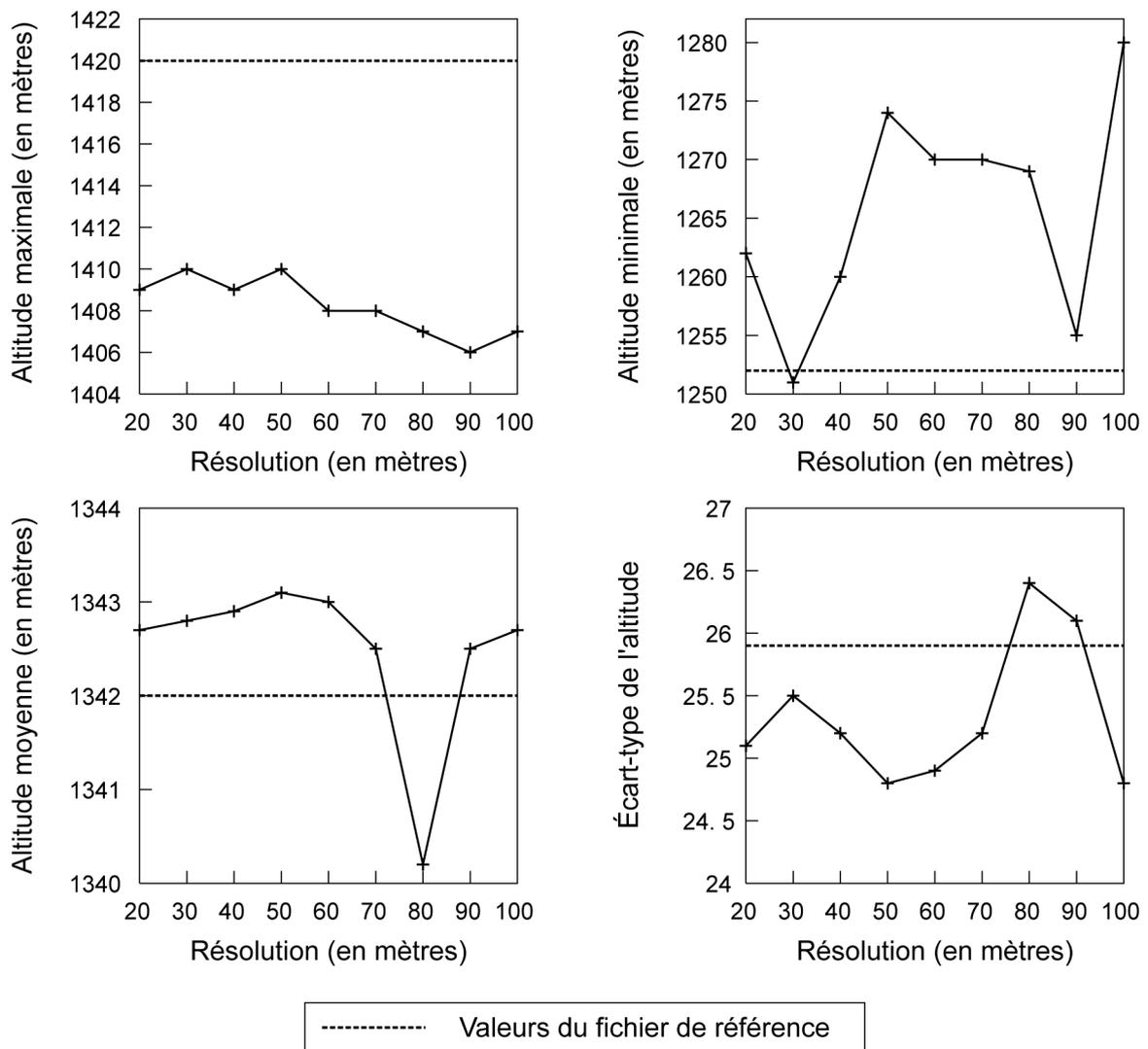


Figure 22 : Évolution des altitudes maximale, minimale, moyenne et de son écart type au niveau de la Roche Gourgon

Cette zone est d'ailleurs significative d'un défaut de qualité de l'information, puisque l'altitude au point culminant est largement sous-estimée, et ce, de la résolution 10 m à 50 m. Il semble qu'au-delà de 70 m, les M.N.T. obtenus ne soient plus très fiables. En effet, on note une diminution significative de l'altitude associée à une augmentation marquée de son écart type.

Nous tenons à rappeler que cette comparaison n'a en aucun cas comme objectif de faire la critique du M.N.T. I.G.N. À 50 m mais simplement d'aider à l'analyse des résultats obtenus à partir des bases de données Pegase.

#### 4.4.2 La pente

Les pentes ont l'air d'être cohérentes par rapport aux courbes de niveau à 10 m.

La simple observation des cartes de distribution de pentes ne suffit pas à analyser l'effet de la résolution et de la taille des fenêtres de saisie. Au mieux, on observe une diminution de l'intensité des pentes avec, simultanément, la résolution et la taille des noyaux (figure 23).

Nous avons donc mis en place quelques graphiques afin de mieux quantifier l'observation précédente (figure 24).

La pente maximale diminue significativement et simultanément à la diminution de la résolution et à l'augmentation de la taille des noyaux de cellules : l'amplitude de cette variation est d'un peu plus de  $12^\circ$ . Le lissage provoque une diminution de 50% de la pente maximale. Les reliefs sont donc fortement atténués, les micro-reliefs totalement gommés.

La pente minimale a un comportement plus erratique, mais reste globalement proche de la valeur  $0^\circ$ .

Ainsi, la pente moyenne a une forte tendance à suivre le comportement de la pente maximale. L'information fournie par ces calculs de pentes est donc clairement modifiée par les conditions dans lesquelles ils sont mis en oeuvre.

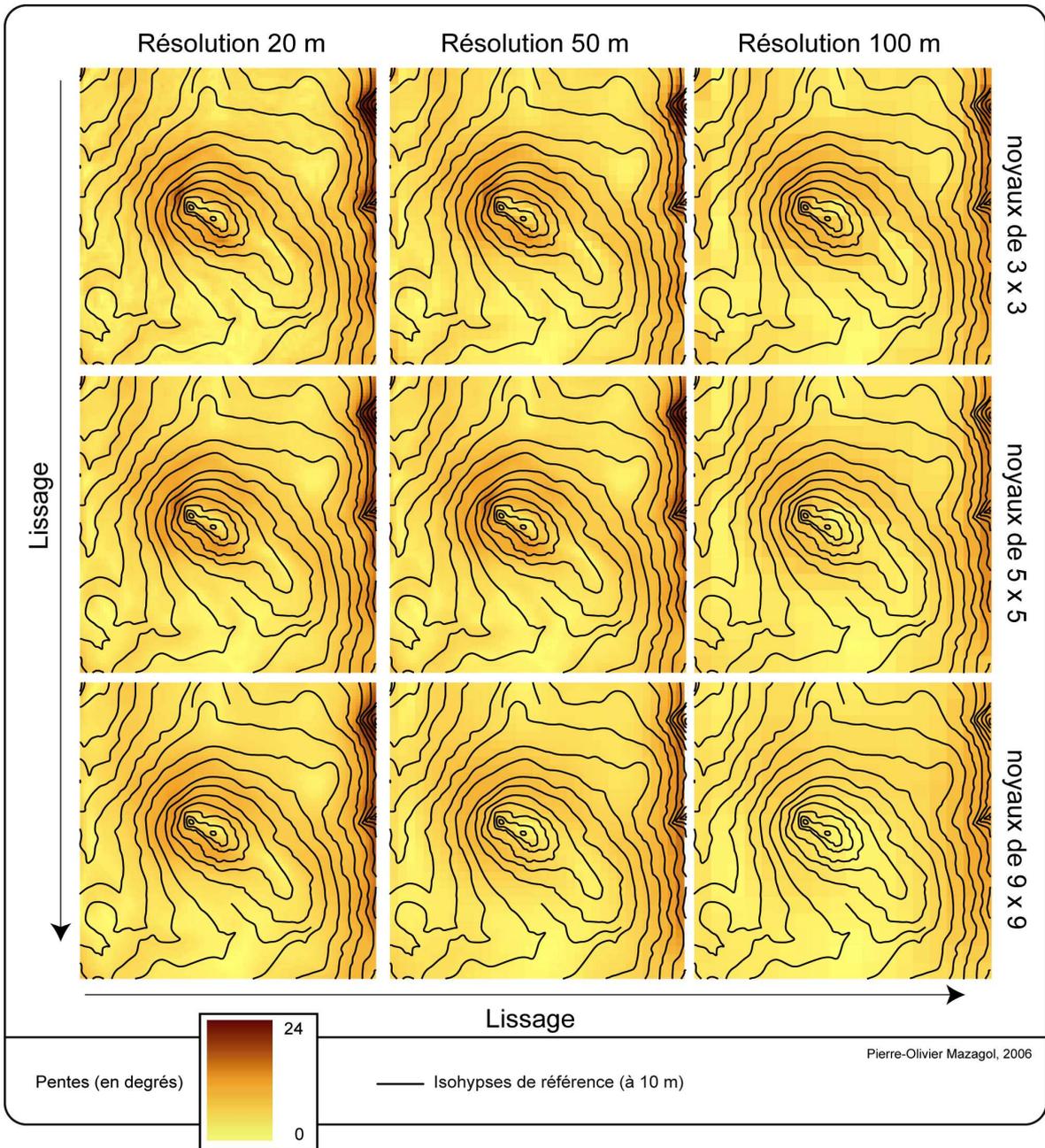


Figure 23 : Évolution de la distribution des pentes en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon)

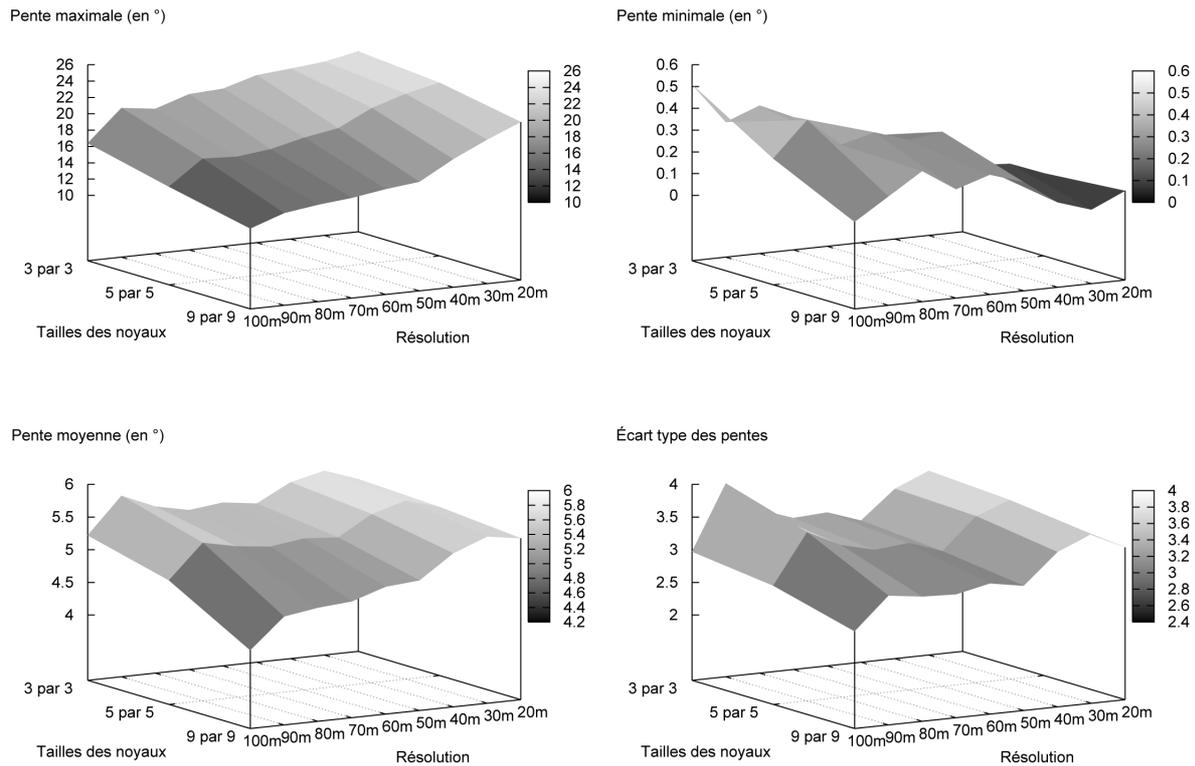


Figure 24 : Évolution des pentes maximale, minimale, moyenne et de son écart type au niveau de la Roche Gourgon

### 4.4.3 L'exposition

Contrairement aux pentes, l'exposition subit moins de contraintes de la part du changement de taille du noyau de cellules (figure 25). Ce dernier permet en fait un lissage individualisant des zones bien distinctes aux fortes résolutions.

Aux faibles résolutions, les résultats sont largement influencés par la perte d'informations au sein de la donnée source. À 100 m, les données récoltées sont souvent clairement corrompues et plus encore lors d'estimation avec de gros noyaux de cellules. On note par exemple, pour la résolution 100m avec des noyaux de 9 cellules par 9, des zones indiquées comme exposées nord-ouest, alors que leur exposition réelle est nord, voire nord-est.

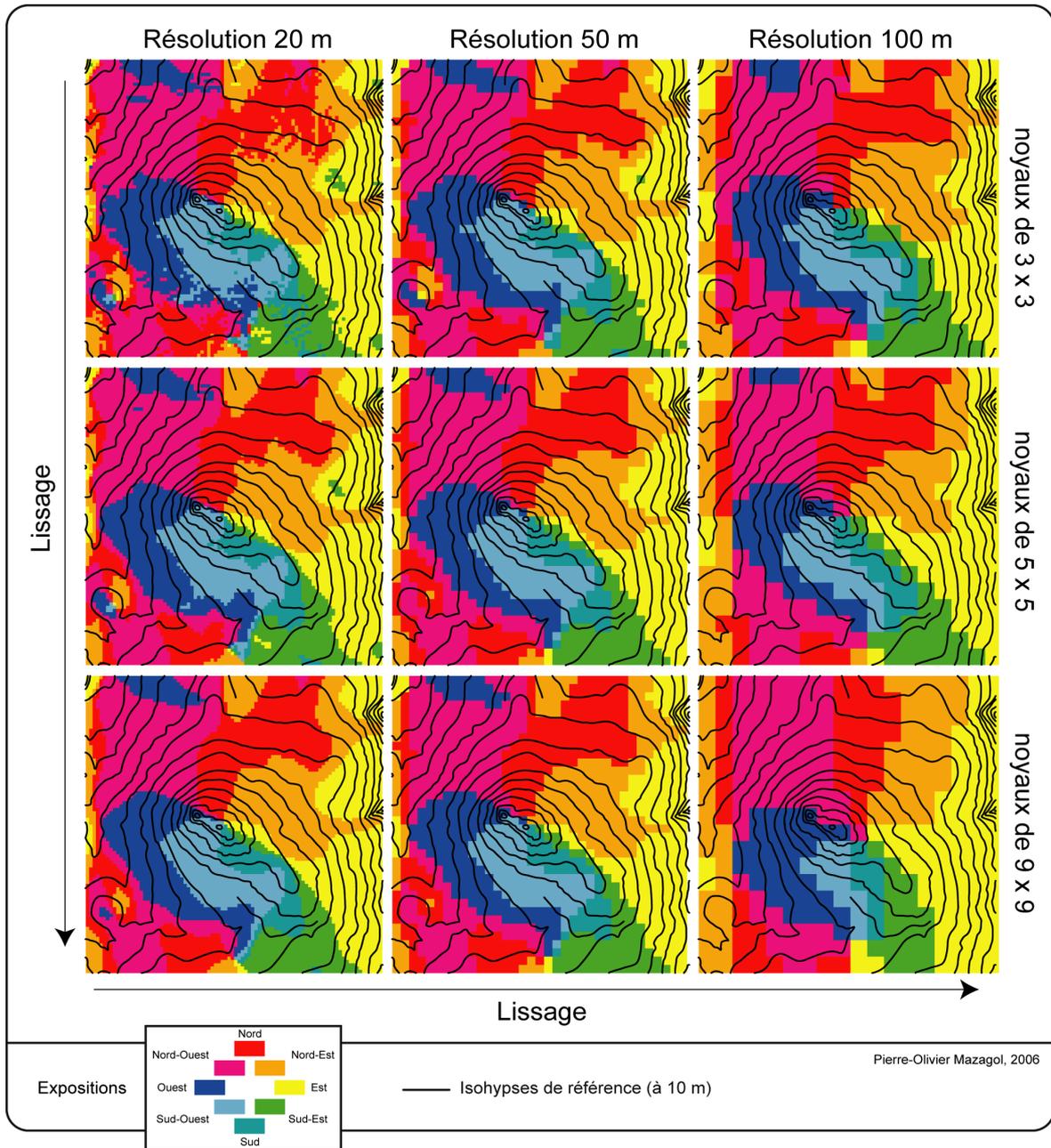


Figure 25 : Évolution de la distribution des pentes en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon)

#### 4.4.4 Les courbures horizontale, verticale et d'accumulation

Les courbures horizontales semblent montrer de manière assez satisfaisante les grands traits du relief, mettant en évidence crêtes et talwegs (figure 26).

On note cependant un léger décalage par rapport aux courbes de niveau du fichier de référence ; décalage, que nous avons d'ailleurs mentionné plus haut, et qui est en lien direct avec la précision de la donnée source.

Mais on note une nouvelle fois l'impact de la résolution à laquelle les calculs sont effectués. En effet, à forte résolution, les petits noyaux de cellules donnent des résultats peu homogènes contrairement aux grands noyaux.

Par contre, aux fortes résolutions, le lissage est fortement accentué par l'utilisation de larges noyaux de pixels.

Il est possible de faire un commentaire similaire pour la distribution des courbures verticales (figure 27), ces dernières mettant par exemple bien en évidence la partie sommitale (la plus accentuée) de la Roche Gourgon.

Enfin, les courbures d'accumulation (figure 28), puisqu'elles sont étroitement liées aux deux courbures précédentes, peuvent faire l'objet de commentaires identiques.

De manière intuitive, il est possible de mettre en relation les différentes zones repérées avec les formes du relief : globalement, les zones « bombées » (comme la roche elle-même) sont le siège de dispersion, les zones « planes » sont marquées par des accumulations et celles de fortes pentes représentent bien les zones de transit.

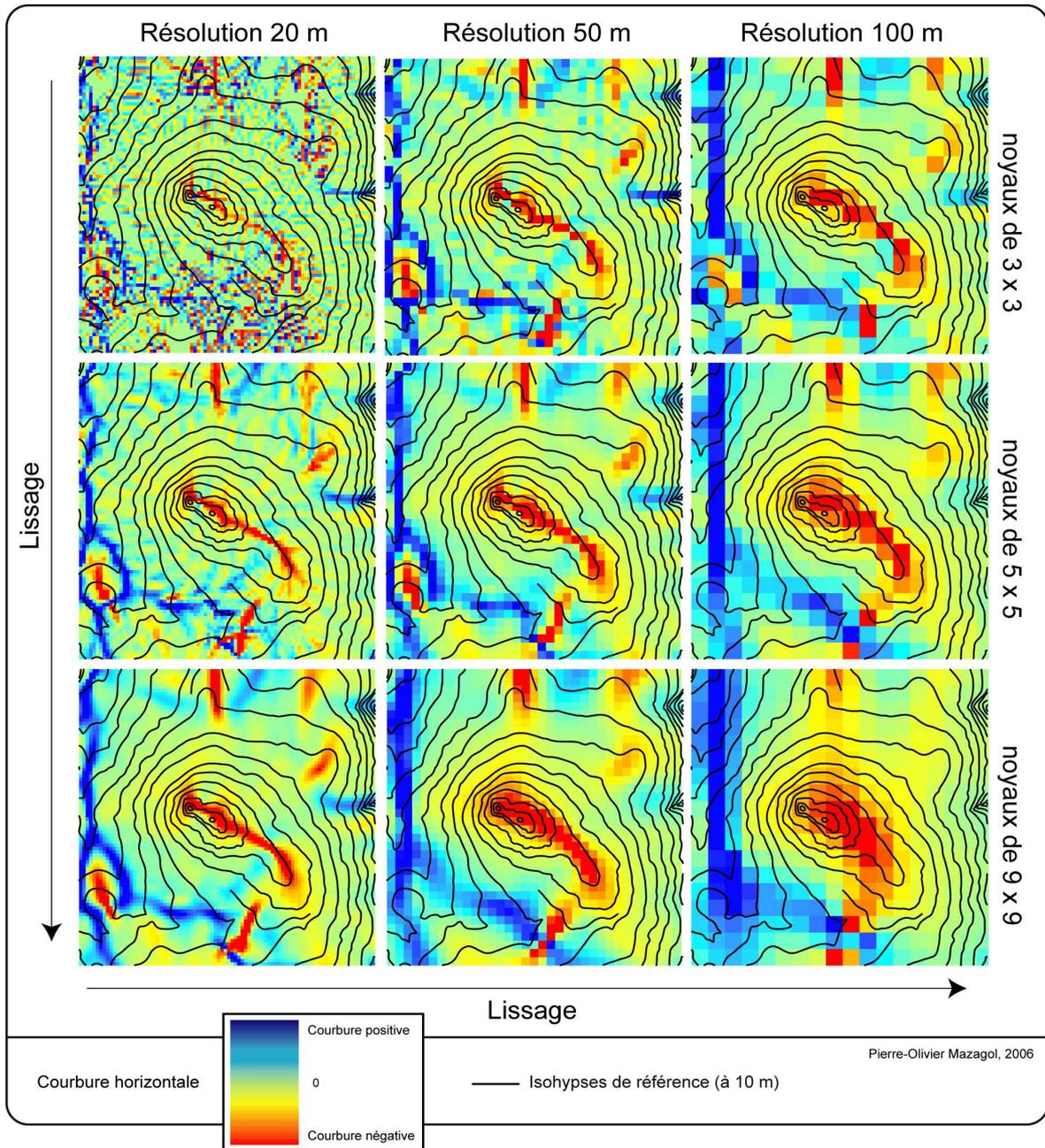


Figure 26 : Évolution de la distribution des courbures horizontales en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon)

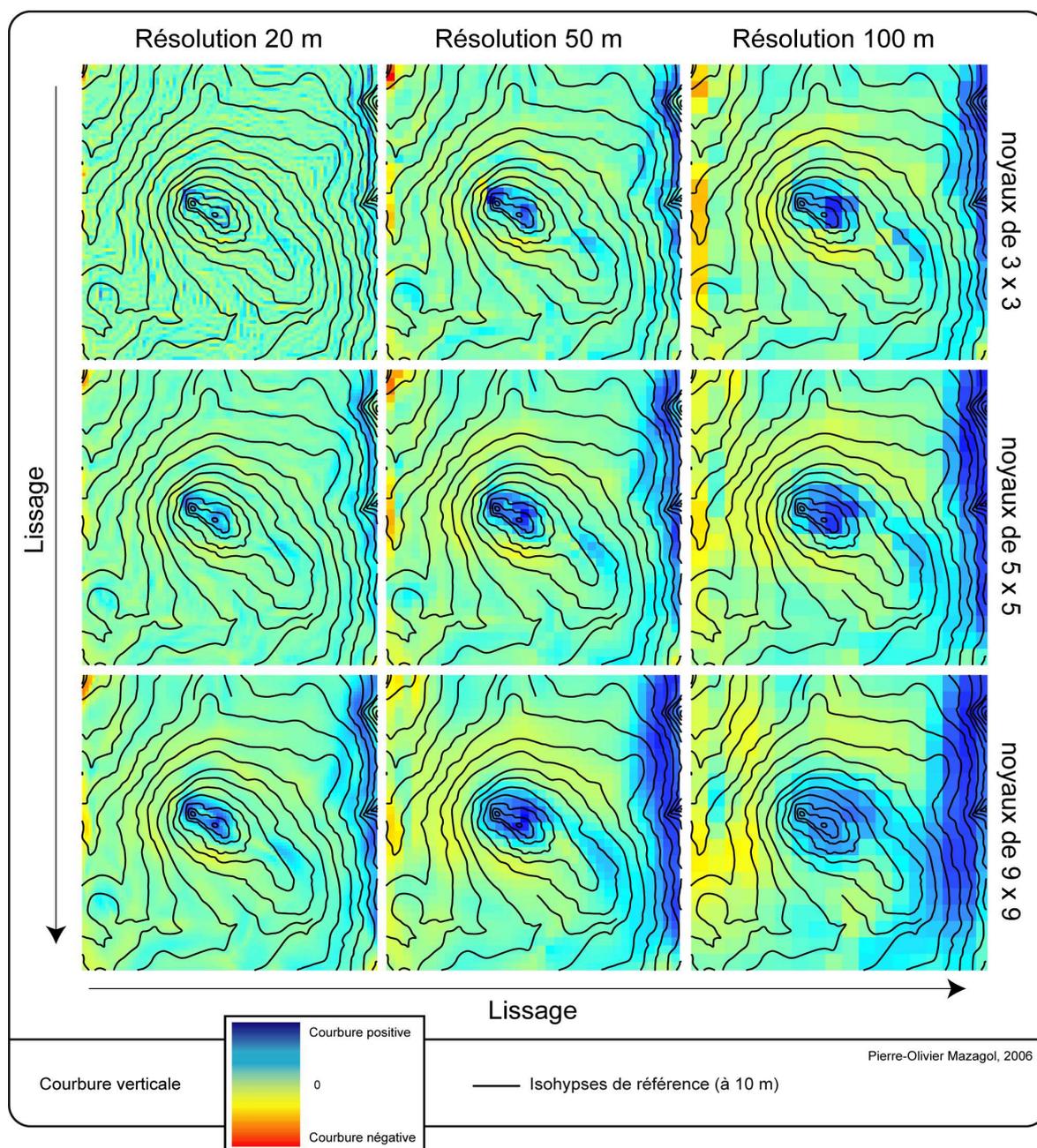


Figure 27 : Évolution de la distribution des courbures verticales en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon)

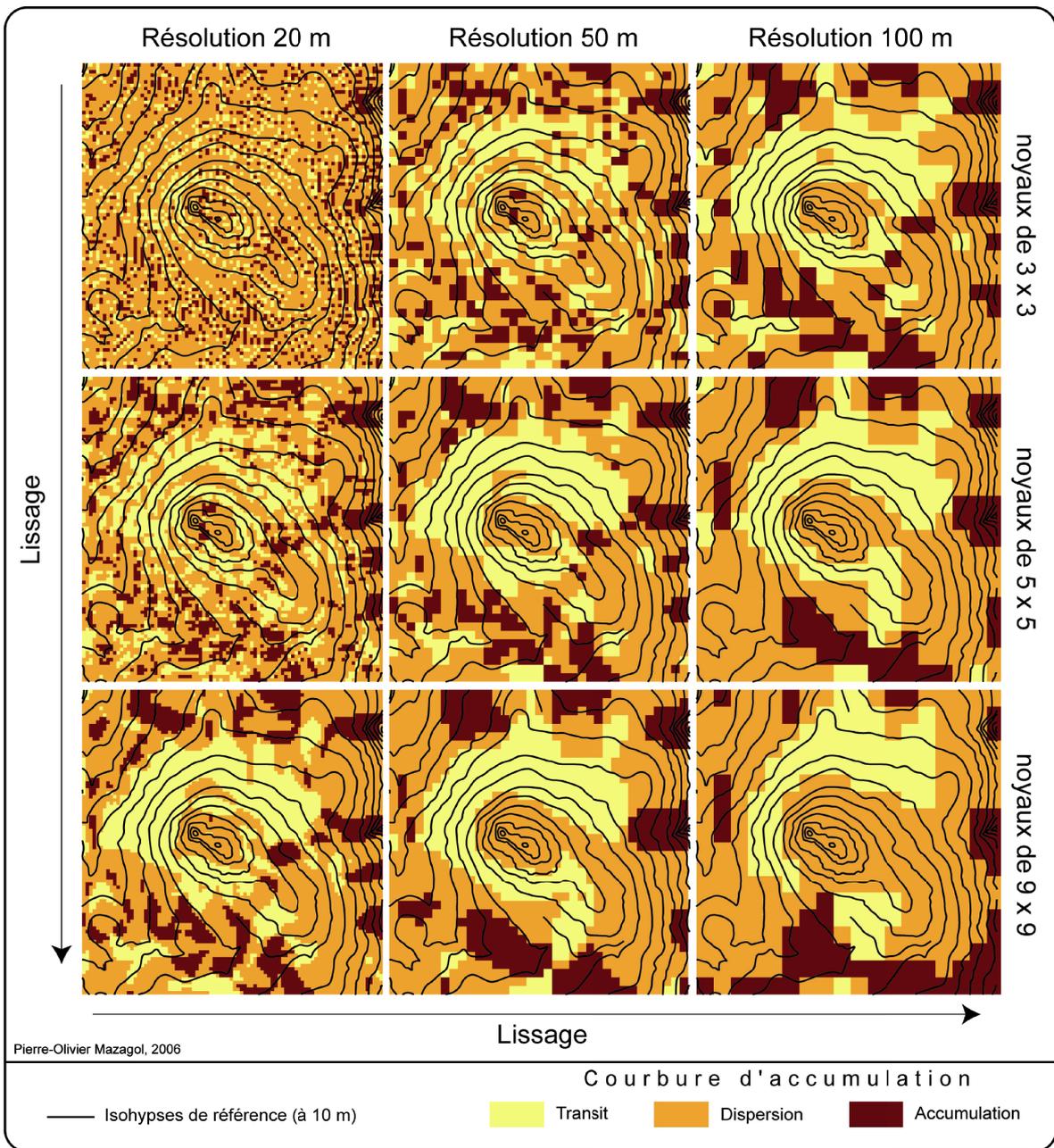


Figure 28 : Évolution de la distribution des courbures d'accumulation en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon)

#### 4.4.5 La rugosité et le relief local relatif

Il est logique de voir apparaître des rugosités plus importantes avec les noyaux de cellules les plus larges (figure 29). Ce sont donc eux qui donnent le plus d'informations sur le relief local (figure 30).

Globalement, quel que soit l'indice considéré, les résultats les moins probants sont logiquement obtenus aux faibles résolutions du fait du lissage provoqué par la transformation des données au cours du ré-échantillonnage.

Les données à forte résolution permettent de mieux cerner les caractéristiques du relief par rapport à la réalité du terrain. Cependant, dans ces conditions, l'utilisation de larges noyaux de pixels mettent mieux en évidence de grands ensembles homogènes quant à l'indice estimé. Lorsque l'on diminue la résolution, l'utilisation de fenêtres de pixels de plus en plus étroites permet de réduire les effets de lissage qui y sont associés.

En revanche, l'étendue, deuxième composante de la notion d'échelle, n'est pas prise en compte. Il est clair qu'au niveau de la Roche Gourgon, les indices estimés à partir du MNT de résolution 100 m, pour des noyaux de pixels à 30 par 30, n'ont guère de sens. Par contre, sur l'ensemble du territoire des Hautes Chaumes, ils devraient prendre une signification toute autre.

Il est possible d'étendre ces remarques aux autres indices topographiques issus de la donnée source que représente l'altitude : quantité théorique de radiation solaire reçue, durée d'insolation, indice topographique...

Une interrogation demeure tout de même quant à la fiabilité des résultats au-delà de la résolution à 70 m.

Enfin, nous pouvons également nous interroger sur l'influence de la méthode d'interpolation choisie pour construire le M.N.T. Il en existe en effet plusieurs qui diffèrent par l'algorithme utilisé, la nature des données en entrée...

Mais outre les problèmes liés à la résolution, certaines interrogations sont nécessaires quant à la validité même de certaines données.

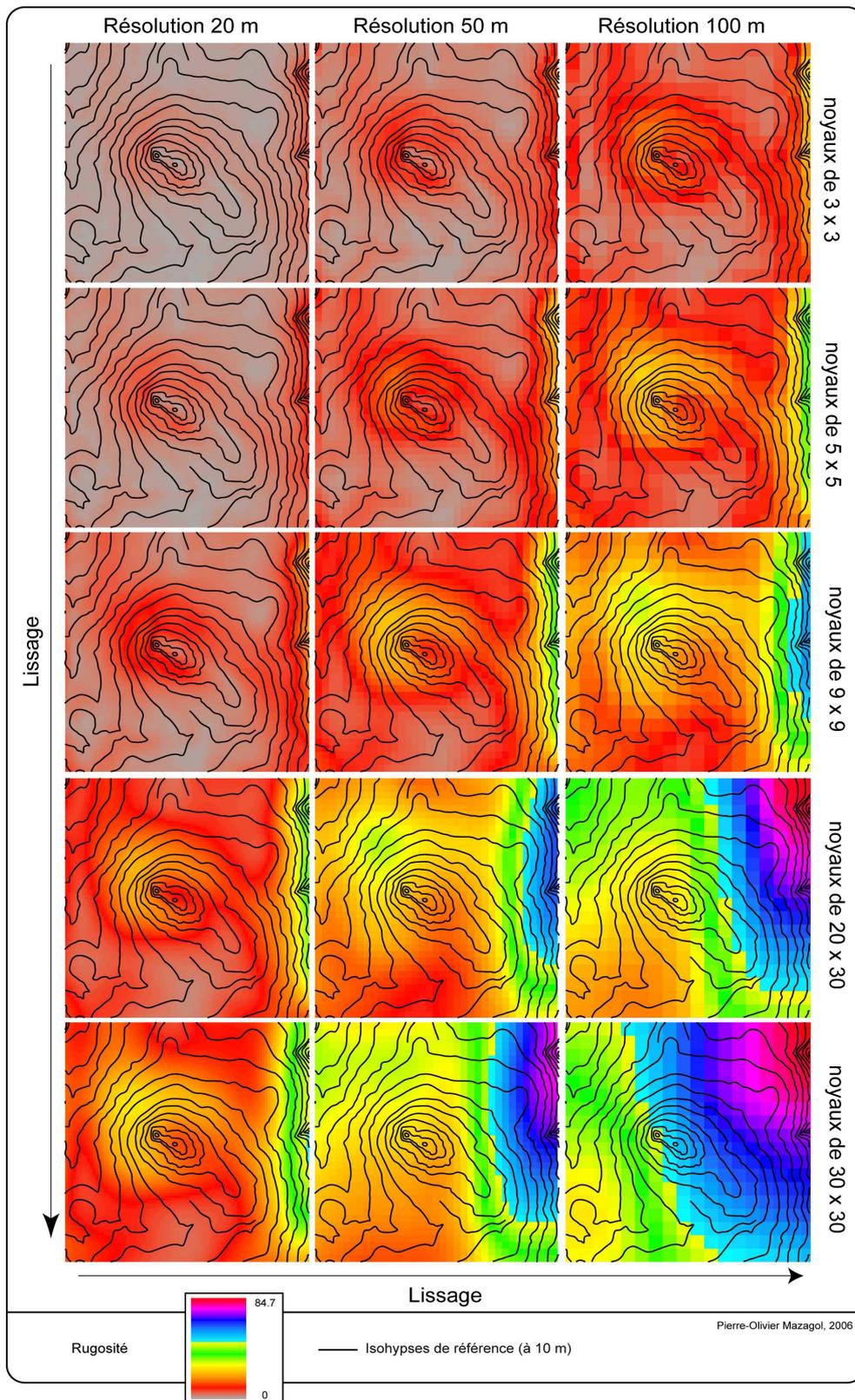


Figure 29 : Évolution de la distribution de la rugosité en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon)

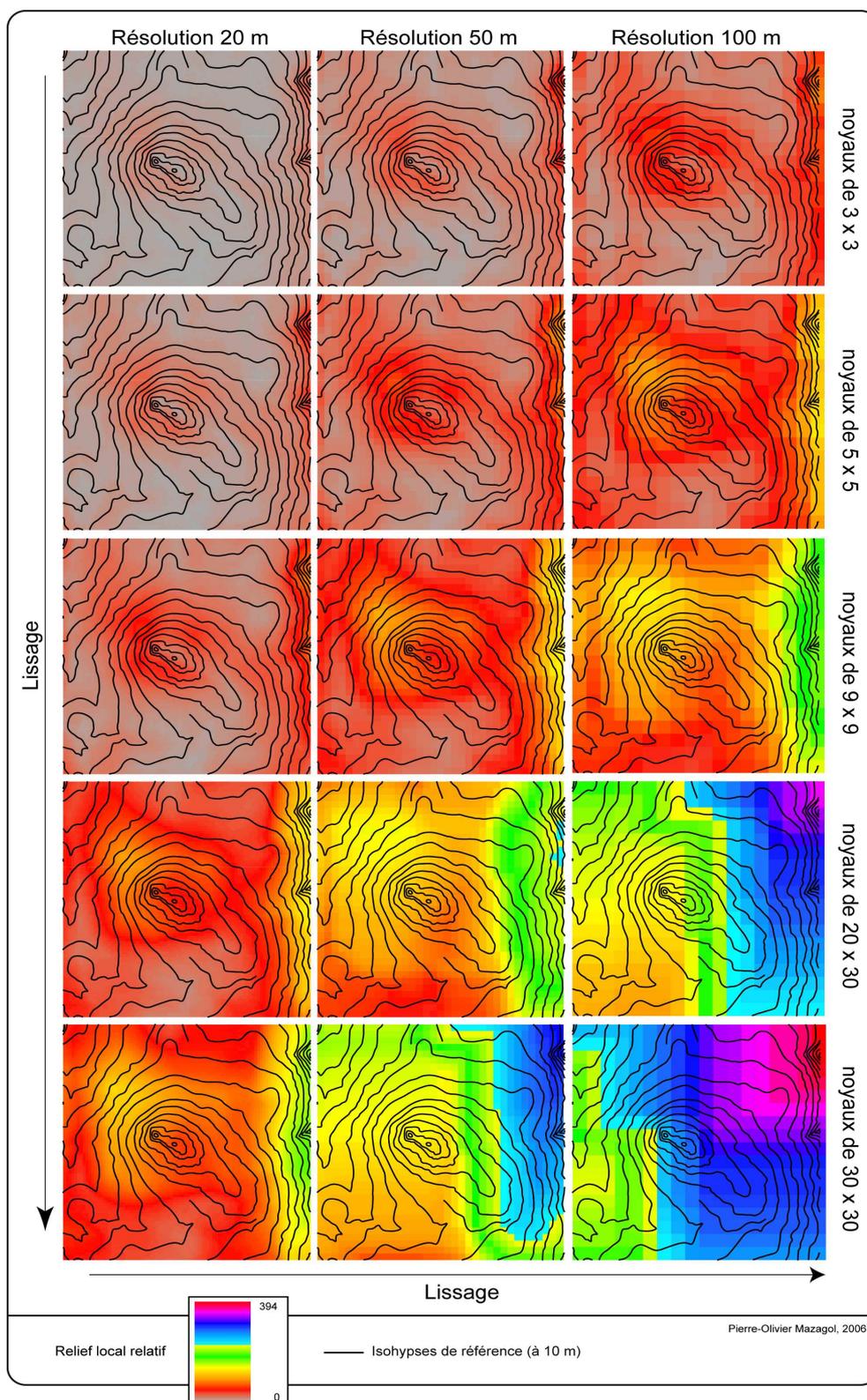


Figure 30 : Évolution de la distribution du relief local relatif en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon)

#### 4.4.6 L'activité pastorale

Plusieurs réserves peuvent être émises quant aux quatre variables en rapport avec l'activité pastorale. En effet, ces cartographies ont été réalisées à partir des données recueillies par Jean-Paul Couhert en 1987 (Couhert 1988) lequel a toutefois travaillé plus particulièrement sur les parcelles de la SICA d'Estive de Granier (dans la Loire).

Ainsi, la validité de ces données peut être discutée sous plusieurs angles :

- La non exhaustivité de l'information ;
- La date d'acquisition des données ;
- la validité des ces données.

Ces deux derniers points sont d'ailleurs étroitement liés. Par exemple, rien ne garantit qu'une parcelle fauchée en 1987 le soit régulièrement chaque année. De la même façon, les utilisations des parcelles peuvent être fluctuantes avec le temps. Les informations que nous possédons sont donc relativement anciennes par rapport à la cartographie de la végétation et il est probable qu'elles ne soient pas valides dans leur totalité.

Cela pose donc le problème d'une forte hétérogénéité au sein des variables, aussi bien au niveau de la précision, de l'échelle, de la date et de l'origine de toutes ces informations.

Enfin, obtenir et posséder un grand nombre de données sur un seul et même terrain d'étude est parfois difficile, car l'achat de ces dernières peut être coûteux et leur acquisition délicate.

Toutes ces considérations concernant les variables devront être prises en compte et pleinement intégrées aux différentes interprétations des résultats que nous présentons ci-après.



## Chapitre 5 : La méthode Pegase

### 5.1 Le processus Pegase

PEGASE (Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique) est une méthode d'analyse basée sur une procédure divisive hiérarchique multivariée basée sur la théorie de l'information. Développée par Michel Phipps, professeur émérite au département de Géographie de l'Université d'Ottawa, elle a pour but la mise à jour de l'organisation d'un paysage et la mesure de son niveau écologique. L'algorithme s'applique sous la forme d'un programme informatique.

La description du fonctionnement de ce processus est largement inspirée des travaux de Michel Phipps (Phipps 1981 ; Phipps 1995 ; Phipps 2001 ; Phipps 2002) et de la thèse de Corinne Lundström-Gilliéron (Lundström-Gilliéron 1999), notamment l'annexe 6.2.

Nous avons cependant cherché à généraliser les concepts liés à l'algorithme en ne faisant plus référence aux notions d'« espaces biotique / abiotique » afin de montrer que l'utilisation de Pegase, malgré son nom, n'est pas réservée à des applications écologiques et peut être employé dans des problématiques ne faisant pas intervenir cette notion de variable biotique.

En revanche nous illustrerons le déroulement du processus à l'aide d'un exemple à partir des toutes premières bases de données que nous avons mises en place sur le territoire des Hautes Chaumes et qui a fait l'objet d'une communication affichée (Mazagol 2003).

#### 5.1.1 Les fondements théoriques

Pegase est un algorithme qui s'appuie sur la théorie des systèmes discrets ou distribués et la théorie de l'information. Son objectif est la mise en œuvre du concept d'ordre, d'organisation, dans un paysage, et d'en donner une mesure. Au cours du déroulement de l'algorithme, de nouvelles hypothèses sur le paysage sont définies, puis

mises en œuvre et finalement vérifiées expérimentalement par la mesure de l'ordre. Mais limiter les potentialités de Pegase à l'analyse paysagère serait réducteur. En effet, nous pouvons étendre son champ à tout système spatialisé.

Les systèmes discrets (systèmes mettant en jeu des informations qui ne sont prises en compte qu'à des moments précis) ont souvent été décrits comme intéressants pour simuler un espace géographique du fait qu'ils permettent d'attribuer et de combiner de façon variable les informations et les fonctions de relations sur les unités spatiales qui constituent cet espace.

Ces unités spatiales peuvent être uniformes, régulières, on parle alors d'un système cellulaire uniforme ou régulier. Dans les études utilisant ce type de systèmes, les cellules ont souvent été choisies carrées ou hexagonales. Elles peuvent aussi être de forme irrégulière, c'est le cas lorsque le paysage est décrit par des unités géographiques, géomorphologiques, pédologiques ou politiques par exemple (Lundström-Gilliéron 1999).

Quelque soit le type de système cellulaire choisi, le nombre d'unités doit être suffisamment important pour qu'il soit possible de découper des classes présentant un type commun de relation.

Enfin, au sein de ce système, chaque unité spatiale est caractérisée par des descripteurs abiotiques, biotiques ou autres qui lui sont associés.

La théorie de l'information, qui constitue la base théorique de la recherche de l'organisation, permet à la fois :

- La mesure de l'information contenue dans un paysage (sa complexité), c'est-à-dire l'information perçue par l'observateur ;
- La caractérisation ses échanges d'information entre écosystèmes (messages allant d'une unité spatiale à une autre) ou du milieu abiotique au milieu biotique (Baudry et Burel 1985).

Elle permet à la fois une étude quantitative et globale, sans nécessiter une connaissance fine des mécanismes de fonctionnement du paysage (Lundström-Gilliéron 1999).

Pegase met en jeu une version thermodynamique de la théorie de l'information, inspirée des travaux de Ludwig Boltzmann<sup>1</sup>. Le formalisme et les outils mathématiques apportés par cette théorie permettent d'atténuer la subjectivité, sans pourtant que les contraintes du système ne soient exprimées par des expressions mathématiques complexes (Lundström-Gilliéron 1999). Les outils mathématiques mis en jeu seront présentés plus loin.

### 5.1.2 Des applications existantes au modèle Pegase

Pegase a été appliqué à différents types de problèmes dans plusieurs études de cas. La première application présente un modèle « dynamique », puisqu'il suit l'évolution d'un paysage à trois époques. Les suivantes présentent des modèles décrivant un paysage à un moment fixe dans le temps.

Michel Phipps (Phipps 1981) cite l'analyse de l'organisation d'un paysage forestier de 14km<sup>2</sup> au Québec, effectuée par Morin (Morin 1979). Cette analyse avait pour but d'expliquer la distribution des communautés d'arbres à l'aide de 9 variables environnementales (topographiques et pédologiques).

Michel Phipps, Jacques Baudry et Françoise Burel (Phipps *et al.* 1986a) ont cherché à définir l'ordre topo-écologique d'un paysage rural péri-urbain d'Ottawa (Canada) par évaluation de la redondance entre l'utilisation du sol et une quinzaine de variables pédologiques et physiographiques. Ils avançaient la notion de niches paysagiques.

Les mêmes auteurs (Phipps *et al.* 1986b) ont cherché à mettre en évidence la dynamique de l'organisation écologique d'un paysage rural. Plus précisément, ils ont évalué les modalités de désorganisation dans une zone péri-urbaine. L'organisation topo-écologique a été mesurée à trois périodes différentes, distinguant deux segments en fonction de leur proximité aux noyaux d'urbanisation.

---

<sup>1</sup> 1844-1906 : Physicien et philosophe autrichien, Boltzmann est considéré comme l'un des principaux créateurs de la théorie cinétique des gaz. Développant cette dernière, il établit que la seconde loi de la thermodynamique peut être obtenue sur la base de l'analyse statistique. Il donne une interprétation et une expression statistique de l'entropie des gaz en une formule (portant aujourd'hui son nom) exprimant l'entropie  $S$  d'un système en fonction de la probabilité  $W$  de son état :  $S = k \times \log W$  (équation de Boltzmann, où  $k$  est la constante de Boltzmann)

Dumanski, Phipps et Huffman (Dumanski *et al.* 1987) ont cherché à évaluer les relations entre des données pédologiques et l'aménagement des terres agricoles. L'étude présente l'analyse de trois régions canadiennes correspondant à des conditions climatiques et édaphiques variables, mais surtout des intensités d'utilisation agricole.

Davis et Dozier (Davis et Dozier 1990) présentent un programme développé sur la base de l'information mutuelle, qui permet d'identifier des classes d'environnements pour la végétation sur une zone d'étude en Californie, sur la base des taches de végétation cartographiées et des variables physiques du terrain.

Phipps, Langlois et Jiang (Phipps *et al.* 1994) présentent l'analyse de deux paysages résidentiels de villages ruraux (municipalités de la région de transition linguistique entre le Canada anglophone et le Québec). L'étude visait à expliquer les groupes ethno-culturels à l'aide de 21 descripteurs de terrains bâtis, caractérisant la localisation par rapport à la rue et au village, la construction (maison ou bâtiment) ainsi que les ornements présents sur le terrain (clôture, arbres, etc).

Phipps (Phipps 1995) présente l'application de Pegase à un paysage dans le sud-ouest du Territoire du Yukon, découpé en 812 cellules de 15m x 15m, sur lequel on a cherché à expliquer la couverture végétale à l'aide de 17 descripteurs physiques.

Graniero et Price (Graniero et Price 1999) ont cherché à évaluer l'importance de facteurs topographiques sur la distribution des tourbières et des landes dans un complexe de tourbières de couverture (The Avalon Peninsula, Newfoundland).

La thèse de Corinne Lundström-Gilliéron (Lundström-Gilliéron 1999) consiste en l'analyse de la dynamique du paysage de la partie Nord-Ouest de la Suisse, entre les années 50 et 90, à travers une analyse historique de l'état du paysage, tel qu'il est perçu par le lièvre brun (*Lepus europaeus*). Cette étude a consisté à identifier les facteurs du paysage déterminants pour cet animal, à évaluer leur tendance d'évolution. Un indice d'abondance de lièvres a été mis en place et la relation le liant à 40 variables paysagiques a été évaluée avec plusieurs méthodes dont Pegase. Cette thèse a également donné lieu à la publication d'un article (Lundström-Gilliéron et Schlaepfer 2003).

Ernoul, Bureau et Poudevigne (Ernoul *et al.* 2003) ont tenté d'estimer la relation existant entre l'utilisation agricole du sol et les différents types de sols pour un terrain d'étude de la vallée de la Seine.

Enfin, nos premiers tests d'utilisation de Pegase (Mazagol 2003) avaient pour but de mettre en lien un couvert végétal avec une série de variables physiques et anthropiques dans le contexte d'un système d'information géographique et utilisant des méta-bases de données (à l'échelle de Pegase).

### 5.1.3 Les notions clefs

#### 5.1.3.1 L'entropie d'information

L'entropie d'information est une mesure de la quantité globale d'information contenue dans un système. Elle représente l'incertitude liée à l'état du système ou dans d'autres termes, la liberté pour le système de prendre différents états (Lundström-Gilliéron 1999).

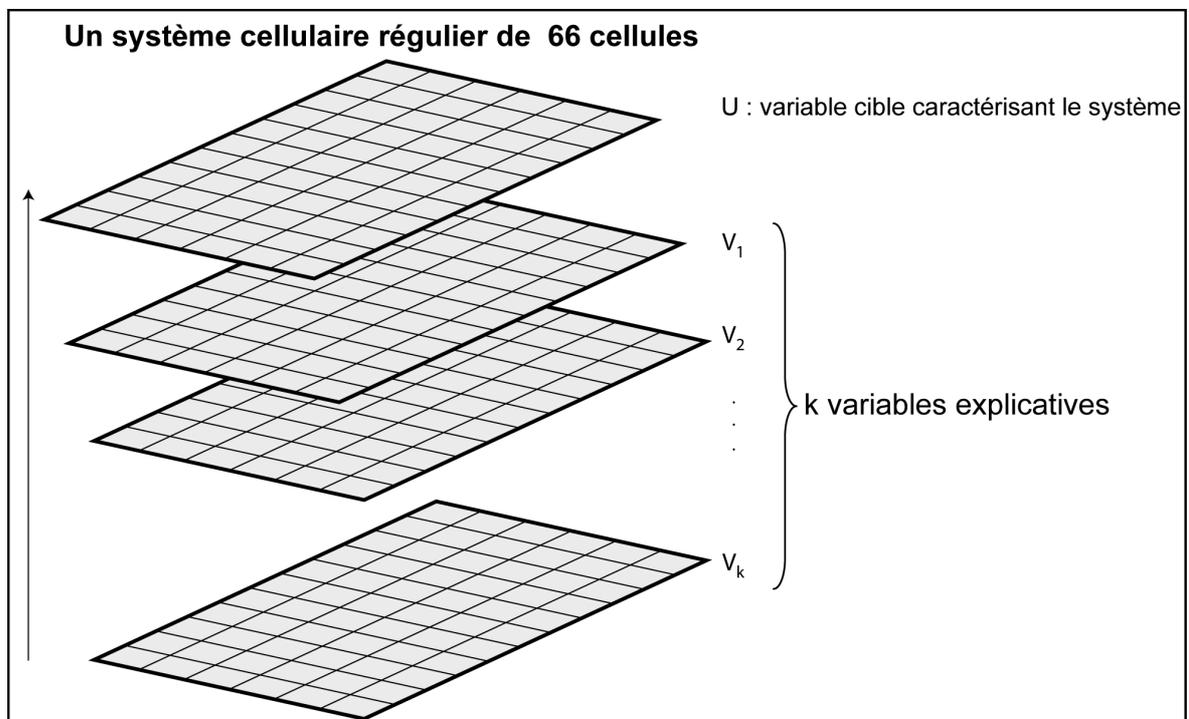


Figure 31 : Représentation schématique des différents éléments du système

On considère le système comme caractérisé par une variable  $U$  appelée variable cible (figure 31).

Le calcul de l'entropie du système se fait par l'utilisation de la « Formule de Shannon » :

$$H(U) = -\sum_{j=1}^m p_j \ln p_j \quad (\text{Équation 30})$$

avec  $p_j$  la probabilité que l'état de cette variable cible de l'unité spatiale observée soit  $j = (1, m)$ .

Le système est constitué d'un nombre fini d'unités :  $N$ . Il est alors possible de calculer le nombre d'occurrences de la variable cible dans chaque état.

$f_j$  est la fréquence d'occurrence du type  $j$  d'occupation du sol. L'entropie du système peut donc aussi s'écrire:

$$H(U) = \frac{1}{N} \left[ N \ln N - \sum_{j=1}^m f_j \ln f_j \right] \quad (\text{Équation 31})$$

La probabilité d'occurrence peut en effet être remplacée par la fréquence d'occurrence relative, par exemple  $p_j$  par  $\frac{f_j}{f_{tot}}$  ou  $\frac{f_j}{N}$  (Phipps 2001).

L'entropie du système peut également se calculer à la fin de la procédure de division par Pegase, une fois qu'une contrainte a été introduite dans le système et a permis la réduction du nombre de configurations possibles. On la nomme « entropie finale ».

La réduction de l'entropie, calculée comme la différence entre l'entropie finale et l'entropie initiale est appelée la « néguentropie ». Elle permet d'évaluer le niveau d'ordre global du système  $U$  décrit par l'ensemble  $V$  (Phipps 2001) et de saisir une propriété fondamentale du système.

Il existe plusieurs façons d'exprimer cette néguentropie.

### 5.1.3.2 L'information mutuelle

L'information mutuelle permet de mesurer le lien entre la variable cible  $U$  et la variable  $V$  introduite comme une contrainte. Cette contrainte est appelée variable explicative : en réduisant l'entropie du système, elle en «explique» une partie.

$$IM(U, V) = H(U) - H_v(U) \quad (\text{Équation 32})$$

avec  $H(U)$  l'entropie initiale du système (équation 30) et  $H_v(U)$  l'entropie conditionnelle (finale), tenant compte de l'ajout d'une contrainte due à la variable  $V$  selon :

$$H_v(U) = \sum_{j'=1}^{m'} [p_{j'} H_{v_{j'}}(U)] = - \sum_{j'=1}^{m'} p_{j'} \left[ \sum_{j=1}^m p_{(j/j')} \ln p_{(j/j')} \right] \quad (\text{Équation 33})$$

$p_{(j/j')}$  étant la probabilité d'avoir  $U$  dans l'état  $j$  ( $j = 1, m$ ) en présence de  $V$  dans l'état  $j' = (1, m')$

Une seule variable explicative est donc, ici, prise en compte, mais il est possible de considérer un ensemble de variables explicatives ( $V_1, V_2, \dots, V_k$ ) dont chaque combinaison donne un environnement particulier  $E$ .

L'ensemble des environnements  $E$  constitue une contrainte, par rapport au nombre de configurations possibles du paysage, qui permet ainsi de réduire l'entropie du système selon :

$$IM(U, E) = H(U) - H_E(U) \quad (\text{Équation 34})$$

avec  $H(U)$  l'entropie initiale (équation 30), et  $H_E(U)$  l'entropie conditionnelle (finale) de  $U$ , connaissant l'ensemble des environnements  $E$  issus de la procédure multivariée :

$$H_E(U) = - \sum_{i=1}^n [p_i H_{E_i}(U)] = - \sum_{i=1}^n \left[ p_i \sum_{j=1}^m p_{(j,i)} \ln p_{(j,i)} \right] \quad (\text{Équation 35})$$

où  $p_j$  est la probabilité d'avoir l'environnement  $E_i$  ( $i = 1, n$ ), et  $p_{(j,i)}$  la probabilité d'avoir  $U$  dans l'état  $j$  en présence de  $E$  dans l'état  $i$ .

Le niveau de signification de cette valeur peut être testé en utilisant la méthode de « maximum de vraisemblance » (*log-likelihood ratio*), aussi connu sous le nom du critère de Kullback (Kullback 1959), à partir de la table de contingences contenant les fréquences associées à ces probabilités (Phipps 2001). Il a été démontré que ce critère tend de façon asymptotique vers la loi du  $\chi^2$  :

$$\xi = (2N \times IM(U,E)) \approx \chi^2 \text{ avec } (n-1)(m-1) \text{ degrés de liberté}$$

où  $n$  est le nombre de configurations possibles du paysage et  $m$  le nombre d'états possibles de la variable cible.

### 5.1.3.3 Le rapport de signification

Le rapport de signification SR (Significance Ratio) est calculé à partir du critère de Kullback selon :

$$SR = \frac{2NI(U, V_k)}{\chi^2_{(m-1)(m'-1)ddl}} \quad (\text{Équation 36})$$

avec  $U$  la variable cible,  $V_k$  une des variables explicatives,  $N$  le nombre total d'individus,  $m$  le nombre d'états de la variable cible et  $m'$  le nombre d'états de la variable explicative.

Par exemple, si  $SR = 2$ , la variable donne deux fois plus d'information que nécessaire pour qu'elle soit significative.

### 5.1.3.4 La redondance R

La redondance est l'expression relative de la néguentropie.

$$R_E(U) = \left( \frac{H(U) - H_E(U)}{H(U)} \right) \times 100 \quad (\text{Équation 37})$$

Elle permet d'estimer la part, en pourcentage, de l'organisation du système  $U$  qui est levée par l'ensemble  $V$ .

### 5.1.3.5 Le canal d'information

Il s'agit d'un concept qui décrit le type de relation existant entre deux informations (figures 32 et 33).

L'expression des classes de la variable cible à travers le canal d'information (induit par l'introduction de contraintes) produit une réduction d'entropie (une négentropie) dans le système traduite par l'information mutuelle ou la redondance.

Une négentropie maximale (donc entropie finale minimale) indique que l'organisation du système a été décrite au mieux. Le nombre minimum de configurations possibles est atteint.

L'entropie finale (correspondant au reste de l'organisation visible) n'est plus due qu'au hasard ou à des causes que les données à disposition ne permettent pas d'expliquer.

Ainsi, l'organisation de l'espace est interprétée comme le résultat d'un ensemble de contraintes, exercées conjointement par plusieurs descripteurs dont la combinaison, inconnue à priori, sera découverte par l'algorithme d'analyse Pegase (Lundström-Gilliéron 1999). Il s'agit ici du cas général : E apporte une information, mais laisse encore une entropie  $H_U(E)$  (figure 32).

Cependant, d'autres configurations peuvent se présenter (figure 33).

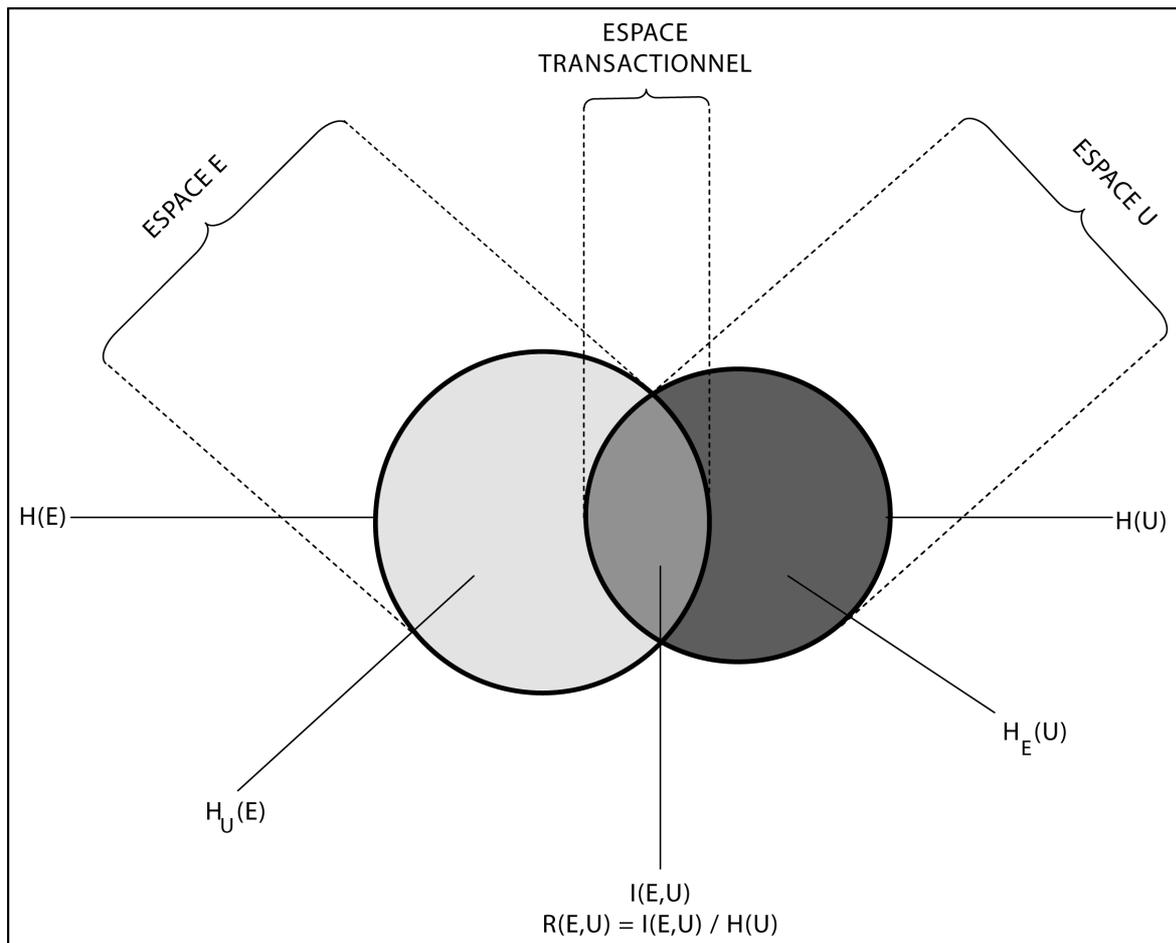


Figure 32 : Illustration du paysage vu comme un canal d'information entre l'espace E et l'espace U. Le chevauchement des deux cercles représente la redondance entre les deux espaces et l'organisation spatiale écologique du paysage (modifiée d'après Phipps 1985)

- H (E) Entropie spatiale des combinaisons d'états de variables explicatives ; Entropie des messages issus des variables explicatives ; Complexité environnementale
- $H_U(E)$  Equivocation du canal d'information ; Part des messages issus des variables explicatives non efficaces dans la prédiction de l'état de la variable cible
- H (U) Entropie spatiale des classes de la variable cible ; Entropie des messages issus de la variable cible ; Complexité spatiale de la variable cible
- $H_E(U)$  Ambiguïté du canal d'information ; Part d'indétermination résiduelle des classes de la variable cible
- I (E,U) Négentropie ; Information mutuelle ; Mesure de l'organisation du système spatial ; Diminution d'entropie due à l'espace transactionnel
- R (E,U) Redondance du canal d'information

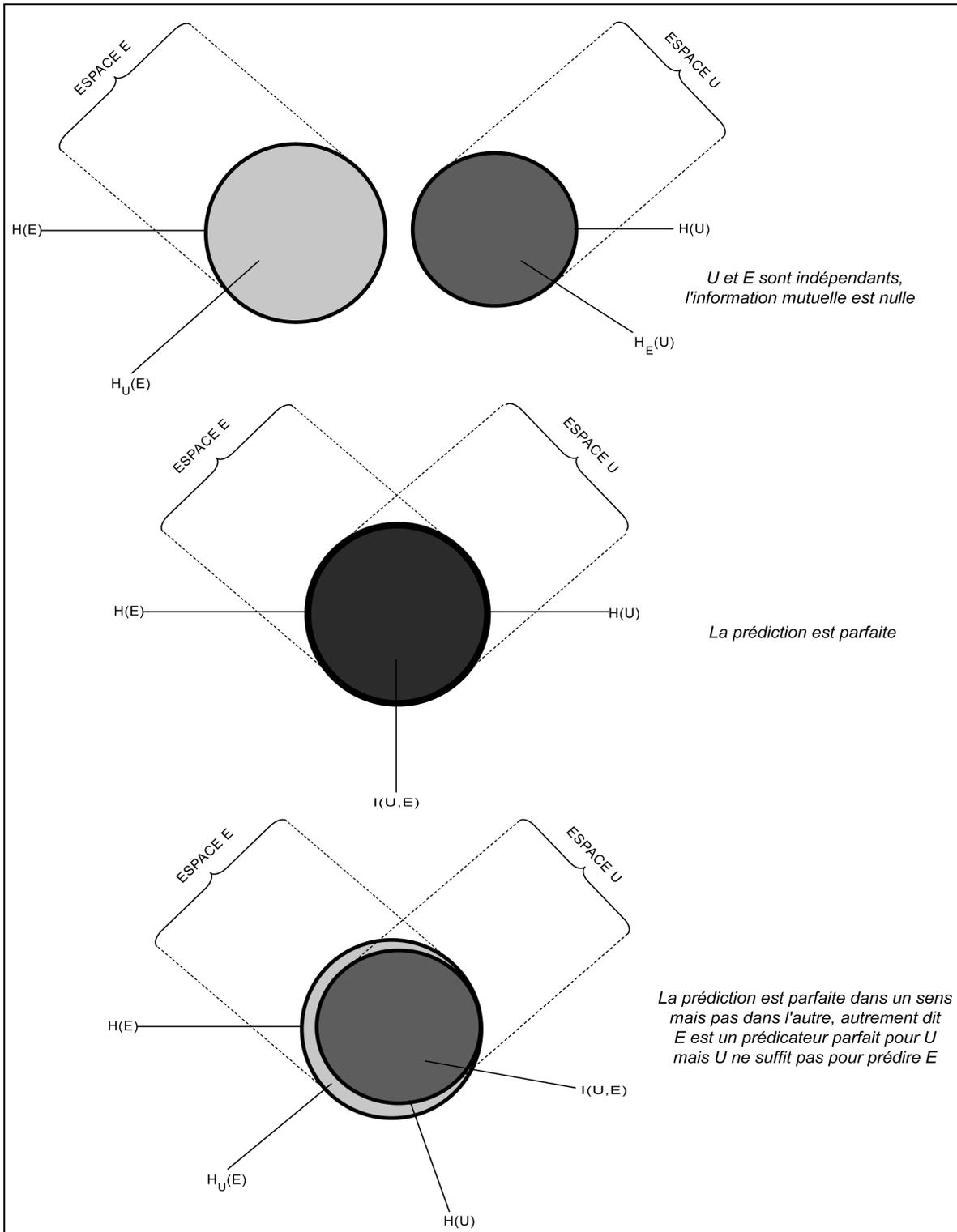


Figure 33 : Représentations schématiques d'autres cas de canaux d'information (modifiée d'après Lundström-Gilliéron 1999)

### 5.1.4 Un exemple à titre d'illustration

De manière à illustrer les explications, quant au déroulement du processus, nous avons choisi de présenter les résultats obtenus avec une de nos premières bases de données Pegase (Mazagol 2003). Nous tenons à indiquer que les résultats issus du traitement de cette base de données n'ont pas de réel intérêt scientifique et ne sont présentés qu'à titre démonstratif.

Cette base de données porte sur le territoire des Hautes Chaumes et comporte 11 variables parmi celles présentées précédemment :

- une variable cible : la végétation (VE) ;
- 10 variables explicatives :
  - Utilisation (UT),
  - Pente (PE),
  - Type de pâturage (PA),
  - Distance au réseau hydrographique (HY),
  - Distance aux zones humides (HU),
  - Formations superficielles (FS),
  - Pratique de fauche (FA),
  - Exposition (EX),
  - Distance aux chemins (CH),
  - Altitude (AL).

La base de données comprend 142 118 cellules et possède une résolution à 20 m.

Nous illustrerons les différentes étapes et résultats par des extraits du fichier de sortie de Pegase et des copies d'écran des graphiques fournis par Pegase.

### 5.1.5 Déroulement du processus

Au cours de l'application de l'algorithme de Pegase, l'ensemble des unités est divisé progressivement par étapes (paliers) en sous-ensembles significatifs.

À chaque palier, les sous-ensembles sont de mieux en mieux définis par les variables explicatives. Dans un premier temps, Pegase détermine quelle variable explicative permet de réduire au maximum l'entropie initiale selon un des trois critères choisis (information mutuelle, rapport de signification ou redondance). Cette variable est une variable divisive.

Chaque sous-ensemble est une zone du système rassemblant des unités où cette variable divisive prend la même valeur. Dans chacune de ces zones, la probabilité d'être en présence d'une certaine valeur de la variable cible est différente. Une contrainte a donc été introduite dans le système, un ordre a été créé et le nombre de configurations possibles de la variable cible réduit (Lundström-Gilliéron 1999).

Le même processus de division de l'espace est ensuite mené dans chacune des zones ainsi créées. La variable divisive peut être différente pour chacun des sous-échantillons, ce qui constitue une différence fondamentale avec une régression multiple. Une variable divisive ne peut par contre pas être utilisée deux fois dans une même arborescence (cheminement le long des embranchements, depuis l'échantillon initial) (figure 34).

Le processus est répété jusqu'à l'obtention d'une division de l'espace, selon une combinaison particulière des variables explicatives qui représente la réduction maximum du nombre de configurations possibles.

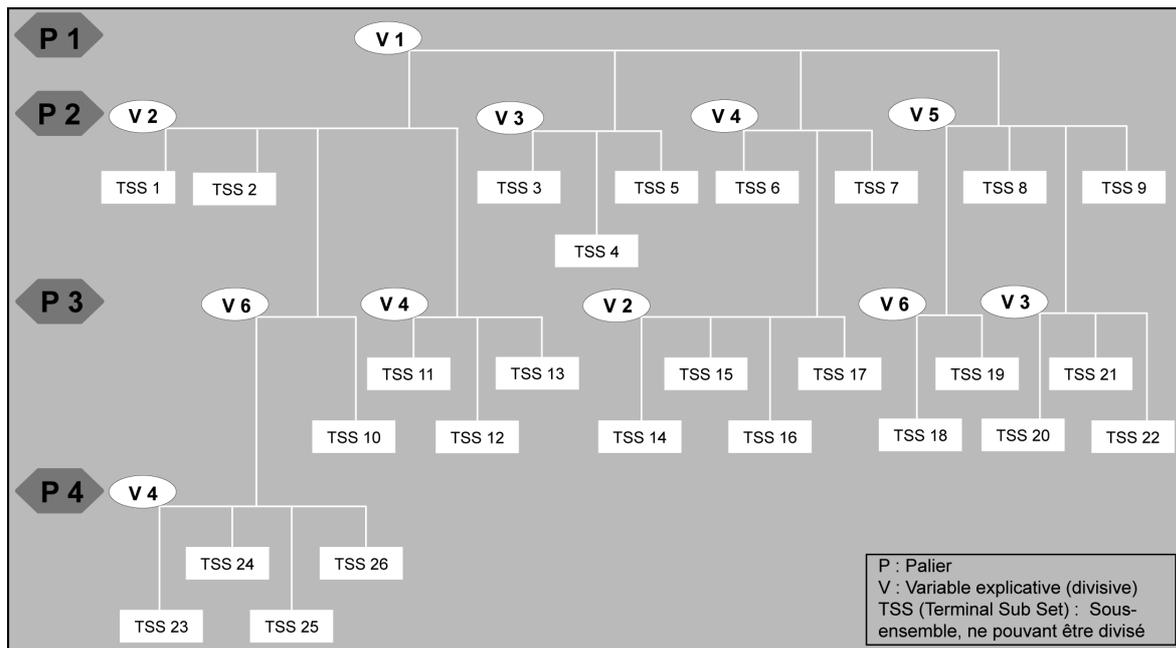


Figure 34 : Dendrogramme de la division hiérarchique

*P* : palier de division

*V* : variable divisive (déterminée par Pegase comme étant celle qui réduit le plus l'entropie du système)

*TSS*: Terminal Sub Set (sous-échantillon qui ne peut plus être divisé).

Le processus de division s'arrête lorsqu'une des trois conditions suivantes s'applique (Phipps 2001) :

- L'entropie du sous-ensemble est inférieure à un seuil au dessous duquel on considère que ce sous-ensemble est déterminé : la combinaison de variables explicatives qui mène à ce sous-ensemble suffit à déterminer l'état de la variable cible avec une certaine probabilité ;
- Le nombre d'unités dans le sous-ensemble est inférieur à un nombre minimum en dessous duquel le test de signification statistique n'est plus assuré ;
- Aucune des deux règles précédentes ne s'applique, mais aucune des variables de l'ensemble *V* non encore utilisées n'apporte d'information statistiquement significative et n'exerce de contrainte significative : soit la base de données ne contient pas la variable qui pourrait lever cette indétermination, soit il s'agit véritablement d'une liberté de choix.

Notre exemple :

ID	HU	FA	AL	UT	CH	HY	PA	EX	CH
1	HU2	FA2							
2	HU2	FA3							
3	HU1	FA1	AL1						
4	HU1	FA1	AL2						
5	HU1	FA3	AL1						
6	HU1	FA3	AL2						
7	HU1	FA3	AL2						
8	HU2	FA1	PE2						
9	HU2	FA1	PE3						
10	HU2	FA1	PE4						
11	HU2	FA1	PE5						
12	HU2	FA1	PE6						
13	HU1	FA1	AL3	FS6					
.									
.									
.									
1874	HU1	FA3	AL3	UT3	CH2	HY1	PA2	EX2	
1875	HU1	FA3	AL3	UT3	CH2	HY1	PA2	EX3	
1876	HU1	FA3	AL3	UT3	CH2	HY1	PA2	EX4	
1877	HU1	FA3	AL3	UT3	CH2	HY1	PA2	EX5	
.									
.									
.									
4276	HU1	FA3	AL9	PA3	HY4	UT2	FS3	EX6	CH2
4277	HU1	FA3	AL9	PA3	HY4	UT2	FS3	EX7	PE1
4278	HU1	FA3	AL9	PA3	HY4	UT2	FS3	EX7	PE1
4279	HU1	FA3	AL9	PA3	HY4	UT2	FS3	EX7	PE1

Figure 35 : Extrait de la liste des caractéristiques des TSS après traitement de la base de données « exemple »

Pour notre exemple (figure 35), on remarque que le TSS 1 a été déterminé au bout de deux étapes de division :

- au palier 1 : par la classe 2 de la variable « Distance aux zones humides » (HU2) ;
- au palier 2 : par la classe 2 de la variable « Pratique de fauche » (FA2).

On voit également que l'on a obtenu 4279 TSS en 10 paliers.

Lorsqu'un sous-ensemble ne peut plus être divisé, il est appelé Terminal Sub Set (TSS). Il peut être décrit par la combinaison des variables explicatives sélectionnées, leur ordre, ainsi que par la négentropie atteinte.

À la fin de ce processus divisif, il est possible, sachant qu'une cellule appartient à l'un ou à l'autre de ces TSS, de prédire, avec une certaine probabilité, l'état de la variable cible.

### 5.1.6 Les paramètres d'exécution

Au vu des indications précédentes, on note qu'un certain nombre d'informations doit être fourni pour la mise en œuvre de l'algorithme. Ces dernières sont renseignées dans le fichier d'entrée du programme et peuvent être modifiées par l'intermédiaire de l'interface graphique (chapitre 5.2.1 figures 50 et 51) :

- Les critères d'arrêt de la procédure doivent donc être renseignés. Il s'agit de l'effectif minimum et de l'entropie minimale requise pour subdiviser un sous-ensemble. Le choix de ces conditions d'arrêt ne devrait pas avoir une influence prépondérante sur le résultat de l'analyse (Phipps 2001) ;
- L'ordre de priorité que l'algorithme doit utiliser dans les cas où deux valeurs du critère de sélection sont *ex aequo* ( $\pm 2,5\%$ ) lors d'une étape de division d'un sous-échantillon doit aussi être renseigné ;
- Il faut indiquer quel critère de sélection doit être utilisé :
  - Soit l'information mutuelle présente le défaut de favoriser la sélection d'une variable avec un grand nombre de classes qui donnent une plus grande quantité d'information,
  - Soit le rapport de signification favorise au contraire une variable avec un petit nombre de classes,
  - Soit l'information relative, étant mieux fondée en théorie, donne souvent un meilleur résultat que les deux premiers. Son utilisation est donc fortement recommandée (Phipps 2002) ;
- Le nombre de paliers maximum permet de limiter la durée d'exécution de l'algorithme. De plus, il donne la possibilité d'effectuer un test préliminaire des variables choisies : un premier essai, sur un seul palier, permet de se rendre compte

si une classe est trop faiblement représentée, auquel cas il est encore possible de redéfinir les classes des variables concernées (Lundström-Gilliéron 1999) ;

- Le nombre de TSS maximum : on ne peut prévoir le nombre de sous-ensembles terminaux que produira une analyse. Le programme réserve donc un nombre arbitraire de zones mémoires pour stocker les informations relatives à ces TSS. Si ce nombre est insuffisant, le programme s'arrête. En augmentant alors ce critère, on étend cette capacité de mémoire et le programme peut fonctionner normalement.

### 5.1.7 Les résultats fournis

Le logiciel Pegase fournit comme résultat un fichier ASCII (\*.pgl) ainsi que des résultats graphiques. Au sein de ce fichier figurent :

- Les caractéristiques de chaque sous-échantillon créé à chaque palier :
  - nombre d'unités constituant le sous-échantillon (figure 36),
  - variable divisive sélectionnée (figure 35),
  - succession des variables divisives amenant au sous-échantillon (figure 35),
  - valeurs des critères de division (figure 35).
- Un tableau d'occurrences des classes de la variable cible par TSS (figure 36).

TSS	Variable cible				Total
	$V_1$		$V_j$	$V_m$	
$TSS_1$					
...					
$TSS_i$			$f_{ij}$		$f_i$
$TSS_n$					
Total			$f_j$		$N$

Tableau 3: Tableau des fréquences des TSS par classe de la variable cible  $V_j$

( $j=1$  à  $m$ , avec  $m$  le nombre de classes de la variable cible ;  $i=1$  à  $n$ ,  $n$  étant le nombre de TSS produits ;  $N$  étant le nombre total d'unités).

Notre exemple :

TSS	VE1	VE2	VE3	VE4	VE5	VE6	VE7	VE8	VE9	V10	V11	V12	TOT
1,	0,	0,	360,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	360,
2,	0,	0,	7768,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	322,	0,	146,	8236,
3,	14,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	14,
4,	140,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	9,	0,	149,
5,	88,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	88,
6,	111,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	4,	0,	115,
7,	0,	0,	0,	328,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	328,
8,	0,	0,	97,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	3894,	3991,
9,	0,	0,	17,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	1231,	1248,
10,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	320,	320,
.													
.													
4270,	0,	34,	0,	9,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	43,
4271,	0,	33,	0,	5,	0,	0,	0,	18,	0,	0,	0,	0,	56,
4272,	0,	2,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	2,
4273,	0,	4,	0,	1,	0,	0,	0,	2,	0,	0,	0,	0,	7,
4274,	0,	2,	0,	0,	0,	0,	0,	27,	0,	0,	0,	0,	29,
4275,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	14,	0,	0,	0,	0,	14,
4276,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0,	0,	1,
4277,	0,	13,	0,	0,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0,	0,	14,
4278,	0,	6,	0,	2,	0,	0,	0,	11,	0,	0,	0,	0,	19,
4279,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0,	0,	1,

Figure 36 : Extrait de la matrice de distribution des classes de la variable cible dans chaque TSS après traitement de la base de données « exemple »

Dans notre exemple, on note que le TSS 1 est composé de 360 cellules appartenant à la classe 3 de la variable cible (VE3).

- Le résultat d’une analyse (factorielle) des correspondances (A.F.C.): Il s’agit de l’analyse simple des correspondances élaborée par Jean-Paul Benzécri (Benzecri 1973), qui s’applique aux tableaux de fréquences (tableau 3). L’utilisation des fréquences pour cette analyse est tout à fait inhérente à la nature de la méthode. En fait la métrique sous-jacente est celle du X<sup>2</sup>. En effet, les écarts entre colonnes (Classes) ou entre lignes (TSS) sont les X<sup>2</sup> calculés sur les fréquences. L’écart global entre les deux ensembles est calculé par rapport aux fréquences théoriques de chaque case du tableau :

$$\left( \frac{\text{marge TSS} - \text{marge Classe}}{\text{Total}} \right) \quad (\text{Équation 38})$$

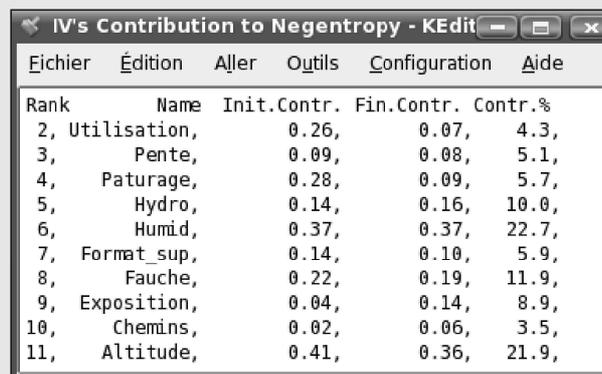
Pour le reste, la méthode fonctionne exactement comme une analyse en composantes principales qui substitue aux variables initiales des facteurs (axes) indépendants. Cette transposition d'axes se fait selon le principe que chaque facteur, calculé successivement, exprime le maximum de la variance restant à ce niveau de la procédure divisive.

Une visualisation de la projection des TSS et des classes de la variable cible sur les plans constitués par les axes factoriels de l'A.F.C., pris deux par deux. Un regroupement des TSS autour d'une classe de la variable cible peut indiquer des conditions favorables à cette classe.

Ce résultat n'est malheureusement pas disponible, pour l'instant, dans le cas des bases de données comportant un nombre important d'unités. C'est le cas pour notre exemple.

- La contribution de chaque variable à la réduction de l'entropie du système (figure 37 et 38).

Notre exemple :



Rank	Name	Init.Contr.	Fin.Contr.	Contr.%
2,	Utilisation,	0.26,	0.07,	4.3,
3,	Pente,	0.09,	0.08,	5.1,
4,	Paturage,	0.28,	0.09,	5.7,
5,	Hydro,	0.14,	0.16,	10.0,
6,	Humid,	0.37,	0.37,	22.7,
7,	Format_sup,	0.14,	0.10,	5.9,
8,	Fauche,	0.22,	0.19,	11.9,
9,	Exposition,	0.04,	0.14,	8.9,
10,	Chemins,	0.02,	0.06,	3.5,
11,	Altitude,	0.41,	0.36,	21.9,

*Figure 37 : Contribution des variables explicatives à la négentropie après traitement de la base de données « exemple »*

Deux variables explicatives contribuent, à elles seules, à plus de la moitié de la négentropie (44,6 % pour un total de 83,5 %) : il s'agit des variables « Humid » (distance aux zones humides) et « Altitude » qui présentent chacune une contribution de respectivement 22,7 % et 21,9 %.

Par contre, les variables « Chemins » (distance aux chemins) et « Utilisation » contribuent de manière beaucoup plus modeste à la néguentropie.

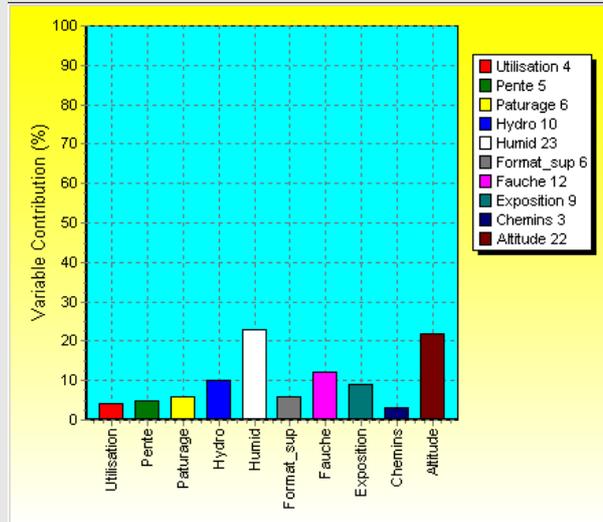


Figure 38 : Représentation par Pegase de la contribution des différentes variables explicatives à la négentropie

- La négentropie atteinte à chaque palier (figure 39 et 40).

Notre exemple :

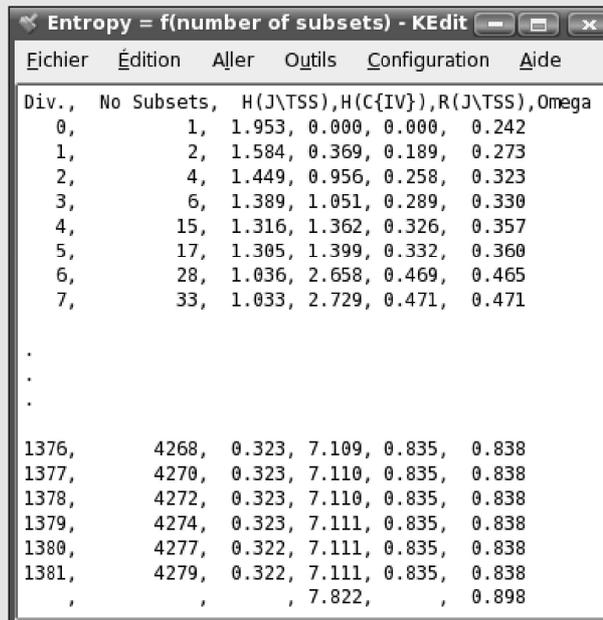


Figure 39 : Évolution du nombre de TSS, de la négentropie et de la complexité au cours du processus divisif

Notre exemple :

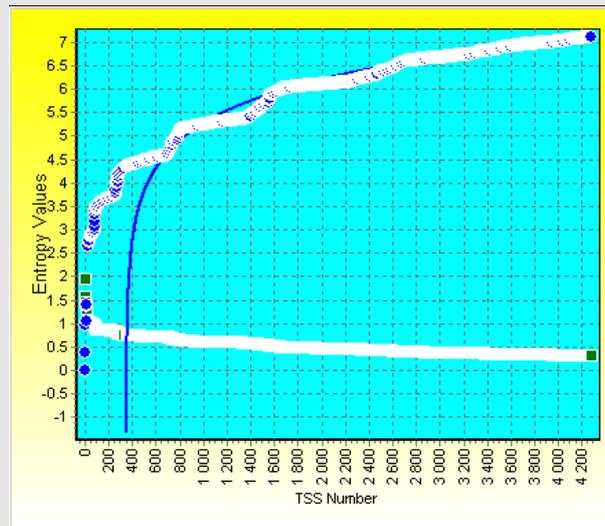


Figure 40: Représentation graphique par Pegase de la chute de l'entropie et de l'augmentation de la complexité en fonction du nombre de TSS

On remarque que l'ensemble des TSS est issu de 1381 divisions.

- La spécificité environnementale de chaque classe de la variable cible montre dans quelle mesure la présence de cette classe est spécifique et exclut la présence des autres classes (figure 41 et 42). Elle est calculée à partir du tableau 3 réduit à deux états :  $C^{*+}$  (la classe  $C^*$  est présente) et  $C^{*-}$  (la classe  $C^*$  est absente) (tableau 4).

TSS	Variable cible	
	$C^{*+}$	$C^{*-}$
$TSS_1$		
...		
$TSS_i$		
...		
$TSS_n$		

Tableau 4 : Tableau des fréquences des TSS par classe de la variable cible réduit aux deux états  $C^{*+}$  et  $C^{*-}$ .

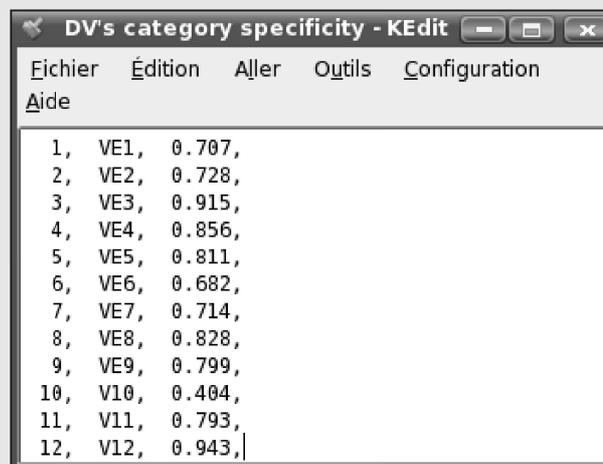
Par définition, c'est la mesure relative de l'information mutuelle par rapport à l'entropie  $C^{*+/-}$  :

$$SpE = \frac{IM(TSS, C^{*+/-})}{U(C^{*+/-})} \quad (\text{Équation 39})$$

Il s'agit donc d'une valeur comprise entre 0 et 1. Si la spécificité est proche de 1, cela signifie que chaque ligne de la matrice est de type 1/0 ou 0/1. La classe  $C^*$  est alors spécialisée par rapport à l'ensemble des TSS. La division en TSS explique donc bien la distribution de  $C^*$ .

Au contraire, une classe dont la spécificité est faible (proche de zéro) est plus polyvalente. La division en TSS ne rend donc pas compte de la distribution de  $C^*$ .

Notre exemple :



Category	Label	Specificity
1	VE1	0.707
2	VE2	0.728
3	VE3	0.915
4	VE4	0.856
5	VE5	0.811
6	VE6	0.682
7	VE7	0.714
8	VE8	0.828
9	VE9	0.799
10	V10	0.404
11	V11	0.793
12	V12	0.943

*Figure 41 : Spécificité des classes de la variable cible après traitement de la base de données « exemple »*

Les classes 3 et 12 de la variable cible possèdent une forte spécificité (VE3 et V12). Leur présence est donc fortement liée à certaines combinaisons de variables explicatives. Au contraire, la classe 10 de la variable cible (V10) est une classe ubiquiste peu inféodée à ces combinaisons.

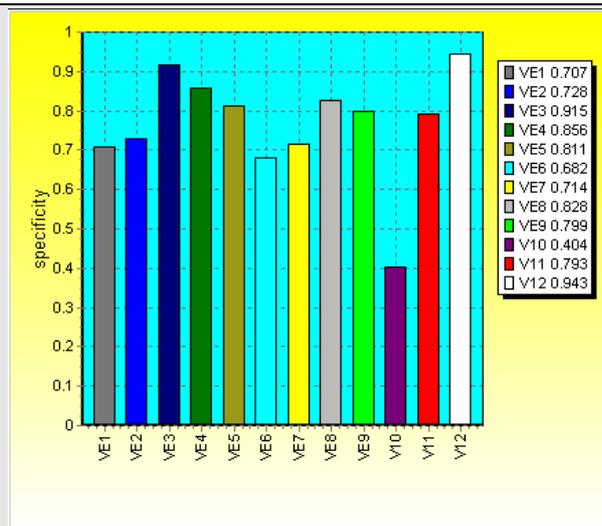


Figure 42: Représentation par Pegase de la spécificité de chaque classe de la variable cible

- L'entropie initiale, l'entropie finale et la redondance (figure 43 et 44).

Notre exemple :

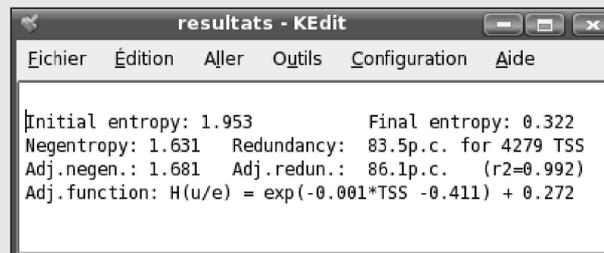
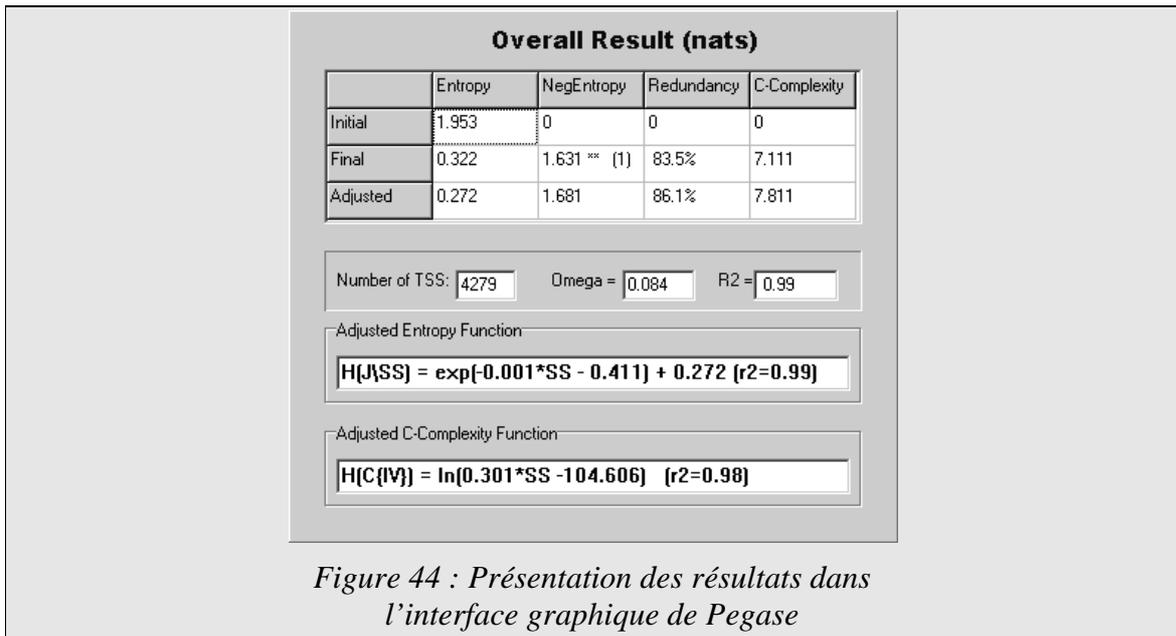


Figure 43 : Résultats obtenus après traitement de la base de données « exemple ».

De 1,953 avant le traitement par l'algorithme, l'entropie est passée à 0,322, soit une différence (une négentropie) de 1,631. Exprimée en pourcentage, cette différence indique la redondance : 83,5 %. Il s'agit d'un excellent résultat.

Ainsi, les variables explicatives sélectionnées permettent de cerner 83,5 % de l'organisation du système. Seuls 16,5 % ne sont donc pas expliqués et sont dus à d'autres variables non prises en compte, voire au hasard.

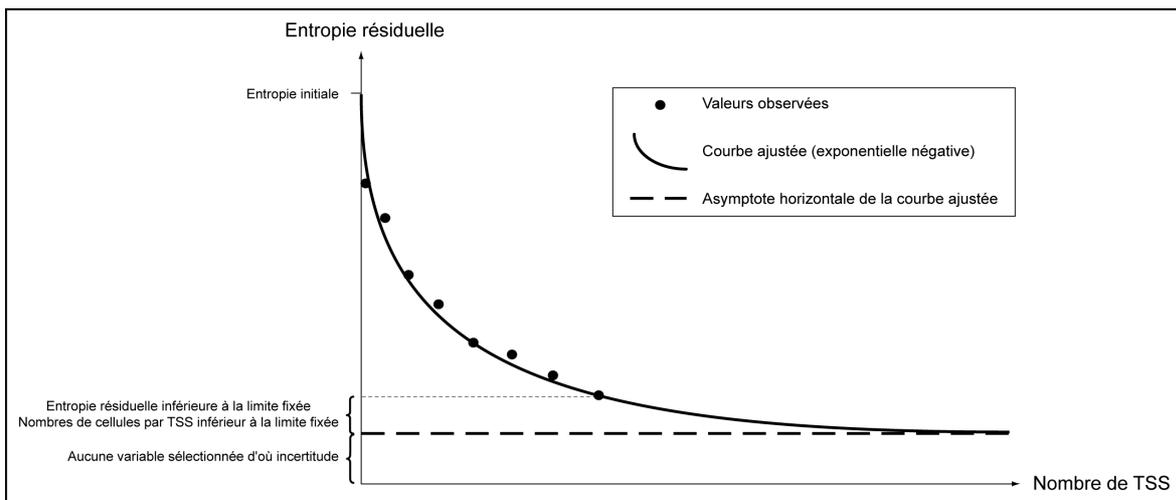
Le principe d'obtention des valeurs ajustées est expliqué ci-après.



- L'entropie ajustée, la néguentropie ajustée et la fonction ajustée:

$$H(U/E) = f(TSS)$$

La diminution de l'entropie (figures 39, 40 et 45), en fonction du nombre de sous-échantillons, suit une exponentielle négative avec une certaine qualité de l'ajustement, mesurée par R<sup>2</sup>. L'ordonnée du dernier point observé donne l'entropie résiduelle observée. L'asymptote horizontale donne la redondance ajustée.



*Figure 45 : Chute d'entropie en fonction du nombre de TSS et courbe ajustée*

Cette fonction d'ajustement admet une asymptote, définie comme l'entropie finale ajustée, montrant l'incertitude qui ne peut être levée par le modèle. Un nombre minimum de divisions est nécessaire pour pouvoir dessiner cette fonction ajustée. Dans les conditions optimales de fonctionnement de l'algorithme, c'est-à-dire lorsque le nombre total d'unités spatiales est grand (de l'ordre de 1000), on obtient un nombre de divisions qui garantit une courbe d'ajustement correcte. Dans le cas contraire, lorsqu'on opère avec un nombre d'unités trop faible, la chute empirique peut apparaître quasi linéaire, sans asymptote et la valeur limite donnée par Pegase devient supérieure à 100%, ce qui est évidemment aberrant (Lundström-Gilliéron 1999). Il est alors nécessaire de chercher de meilleurs critères de fonctionnement de Pegase.

La différence entre l'entropie finale ajustée et l'entropie finale observée (figure 45) traduit le fait que le processus de division s'est arrêté avant que toute la néguentropie du système ait pu être révélée.

Deux raisons peuvent être avancées (Lundström-Gilliéron 1999) :

- soit il y a des effectifs trop faibles dans plusieurs sous-ensembles terminaux (première règle d'arrêt),
  - soit la valeur seuil de l'entropie résiduelle est trop élevée (deuxième règle d'arrêt). La qualité du modèle est évaluée, entre autres, par la redondance atteinte (différence entre l'entropie finale ou résiduelle, et l'entropie initiale).
- L'entropie environnementale (complexité du modèle), l'entropie environnementale ajustée et la fonction ajustée  $H(E) = f(TSS)$ .

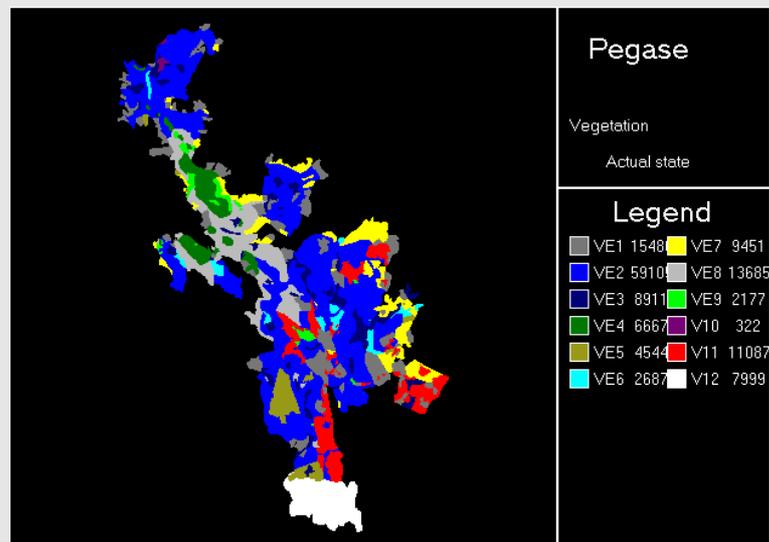
L'entropie environnementale mesure la diversité des combinaisons de variables explicatives : le nombre de variables divisives ainsi que le nombre de combinaisons de ces variables augmentent à chaque nouveau palier. L'entropie environnementale croît suivant une courbe logarithmique, en fonction du nombre de TSS. Elle n'admet donc pas d'asymptote. On ne peut donc lui assigner de valeur « théorique maximale » qu'en fonction d'un nombre donné de TSS.

Par convention, Michel Phipps a choisi comme entropie environnementale ajustée la valeur lue sur cette fonction ajustée correspondant à un nombre de TSS équivalent au double du nombre observé de TSS à l'arrêt de la procédure.

Pegase présente également diverses cartes.

- Les variables explicatives et la variable cible peuvent être visualisées par une représentation spatiale du système étudié (figure 46).

*Notre exemple :*



*Figure 46 : Cartographie de la végétation par Pegase dans le cadre de notre exemple*

- Un état probable de la répartition de la variable cible peut être simulé à partir de la matrice des probabilités d'occurrences de chaque classe de la variable cible par TSS calculée sur la base du tableau 3 (figure 47).

Notre exemple :

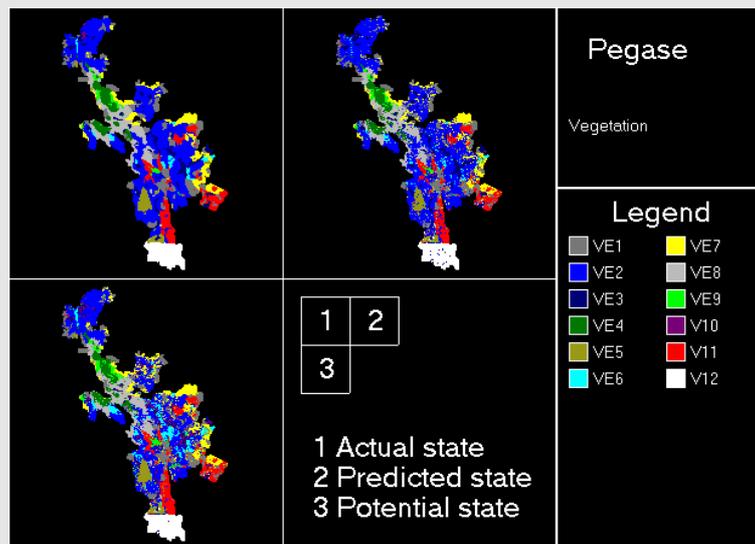


Figure 47 : Cartographies des états actuel, prédit et potentiel présentées par Pegase dans le cadre de notre exemple

On note une bonne correspondance entre les trois cartes. Le système et les phénomènes ont donc été traduits de façon satisfaisante.

- Une distribution spatiale de l'état potentiel de la variable cible. Cette probabilité potentielle est obtenue à partir de la fréquence observée et d'une fréquence théorique attendue, également dépendante des fréquences  $f_i$  et  $f_j$  du tableau 3 (figure 47).

Si ces deux résultats simulés ressemblent à l'état réel observé, on peut dire que dans le cas de notre exemple, on remarque que cette ressemblance est importante.

- Pegase permet encore de visualiser l'entropie résiduelle (finale) de chaque unité à la fin de la division (figure 48).

Notre exemple :

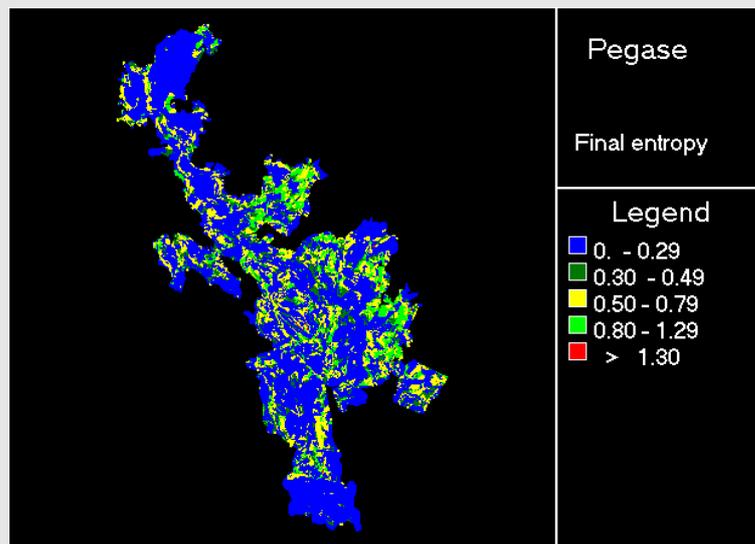


Figure 48 : Cartographie de l'entropie résiduelle en fin de procédure par Pegase dans le cadre de notre exemple

Les zones où l'entropie reste importante en fin de procédure sont largement minoritaires (zones jaunes et vertes). Ces dernières nécessiteraient une analyse plus poussée de manière à déterminer ce qui les caractérise par rapport aux autres zones. On entre alors dans une phase exploratoire.

### 5.1.8 Les apports de Pegase

Le processus Pegase permet donc d'associer, à chaque classe de la variable cible, des combinaisons de descripteurs déterminant les conditions effectives de l'expression de cette classe dans le système.

Pegase ayant été conçu, à l'origine, pour analyser les paysages, et par analogie avec la notion de niche écologique d'une espèce, Pegase cherche donc à définir la « niche paysagique » de ce type d'occupation du sol (Phipps *et al.* 1986b). Il tente de découvrir le modèle d'organisation écologique du paysage. Ce concept de niche reste valable quel que soit le système spatial considéré. On pourrait ainsi, par exemple, parler de « niche urbaine » dans le cadre d'une analyse dans un contexte urbain.... On estimera aussi le degré de contrainte liant chaque communauté à ces facteurs favorables, en calculant un indice de spécificité de sa niche .

La procédure d'analyse permet de déterminer les facteurs structurants du système spatial et de mesurer leur importance relative dans son organisation. Elle aboutit donc à la hiérarchisation de ces facteurs. Elle montre en outre comment ces facteurs se combinent pour former des profils de conditions significatives associées à l'expression des diverses classes de la variable cible, c'est-à-dire leurs niches.

### 5.1.9 Évaluation de la qualité du modèle

Pegase ne nécessite pas de validation au sens habituel du terme, la qualité du résultat étant garantie par la structure mathématique sur laquelle repose l'algorithme de la procédure (Lundström-Gilliéron 1999).

Le jeu de ces options influe évidemment sur le processus de division et, par conséquent, sur les résultats de l'analyse notamment en ce qui concerne le nombre et la composition des sous-ensembles terminaux. En règle générale, avec une base de données à effectif important (au moins de l'ordre de 1000 unités spatiales), la disparité des résultats est relativement réduite (Lundström-Gilliéron 1999). Celle-ci tend, au contraire, à augmenter avec la diminution de l'effectif de départ. Cependant, dans un cas comme dans l'autre, se pose la question de l'évaluation des résultats de la procédure.

Différents critères permettent d'évaluer la qualité du modèle en fonction des options choisies, des données introduites. Ils permettent alors d'améliorer cette prédiction, d'envisager l'introduction de nouvelles variables ou de restructurer les variables déjà prises en compte dans la base de données.

#### 5.1.9.1 La carte de l'entropie résiduelle

Cette carte (figure 48) montre la distribution spatiale de l'entropie qui n'a pas ou peu été réduite en fin de procédure. Sans indiquer les variables manquantes, elle montre parfois des structures spatiales avec des zones de forte entropie caractérisant un manque d'information. Elle permet donc d'envisager quelles variables, dans ces zones critiques, apporteraient une quantité d'information importante.

### 5.1.9.2 La spécificité des classes de la variable cible

Cette spécificité mesure la capacité du modèle à retrouver les classes de la variable cible, lors d'une simulation. Elle montre le degré de dépendance de chaque classe par rapport à la combinaison de variables produite par le programme (figures 41 et 42). Si une variable a une spécificité faible, elle est peu liée à cette combinaison. On peut alors envisager quelles variables permettraient de mieux cerner la « niche » de cette classe de la variable cible.

### 5.1.9.3 La contribution des variables divisives à la néguentropie

Elles permettent d'interpréter la signification écologique du résultat de l'analyse (figures 37 et 38).

### 5.1.9.4 La matrice de succès de la prédiction

Elle indique la probabilité qu'une unité appartenant effectivement à une classe de végétation soit prédite comme appartenant à cette classe. Elle montre également les probabilités de prédiction erronée (sachant qu'une unité appartient à une classe donnée, le programme l'associe faussement à une autre classe).

### 5.1.9.5 Les tests de succès

Nous avons mis en place ces tests en nous inspirant de la métrique de succès défini par Corinne Lundström-Gilliéron (Lundström-Gilliéron 1999).

Nous sommes partis du principe que parmi les modalités de notre variable cible, certaines pouvaient avoir été confondues soit au moment de la mise en place de la cartographie de la végétation, soit au cours du processus Pegase (du fait de niches paysagères proches). Ce pourraient être, par exemple, différents types de landes, ou encore différents types forestiers, mais aussi, au vu de nos constatations, les « herbacées » « fumades » et « sols nus ». Nous associons donc certains types d'occupation du sol en fonction de ces considérations. Ce test de succès est mis en place à partir du tableau 3. Il possède deux niveaux : un niveau primaire et un niveau secondaire. Les exemples présentés sont tirés d'une base de données différentes que celle utilisée précédemment.

## 5.1.9.5.1 Le test primaire T

Il correspond au pourcentage des unités qui sont bien classées, c'est-à-dire dans la classe la plus représentée par TSS. Ce test correspond au succès global d'ordre 0 de Corinne Lundström-Gilliéron.

## 5.1.9.5.2 Le test secondaire T'

Le test T' correspond au pourcentage des unités classées dans le type le plus représenté par TSS ou dans un des types qui lui sont associés. Ainsi, ce test tient compte des regroupements « a priori ». Il est calculé pour chaque classe de la variable cible.

Le test  $T'_g$  généralise les résultats des tests à l'ensemble du modèle.

## 5.1.9.5.3 Exemple de calcul des tests de succès

Pour faciliter la compréhension de la méthode de calcul des tests de succès, nous avons extrait un échantillon de la base de données Hautes Chaumes.

Sur la figure 49, la matrice 1 correspond au tableau 3, c'est-à-dire à la matrice d'occurrence des types d'occupation du sol par TSS. Les couleurs correspondent au regroupement des types par groupes. En foncés apparaissent les maximums.

	Variable cible					
TSS	$V_1$		$V_j$		$V_m$	Total
$TSS_1$						
...						
$TSS_i$			$f_{ij}$			$f_i$
$TSS_n$						
Total			$f_j$			$N$

Tableau 5 : Organisation générale de la matrice 1 des tests de succès correspondant au tableau des fréquences des TSS par classes de la variable cible (tableau 3)

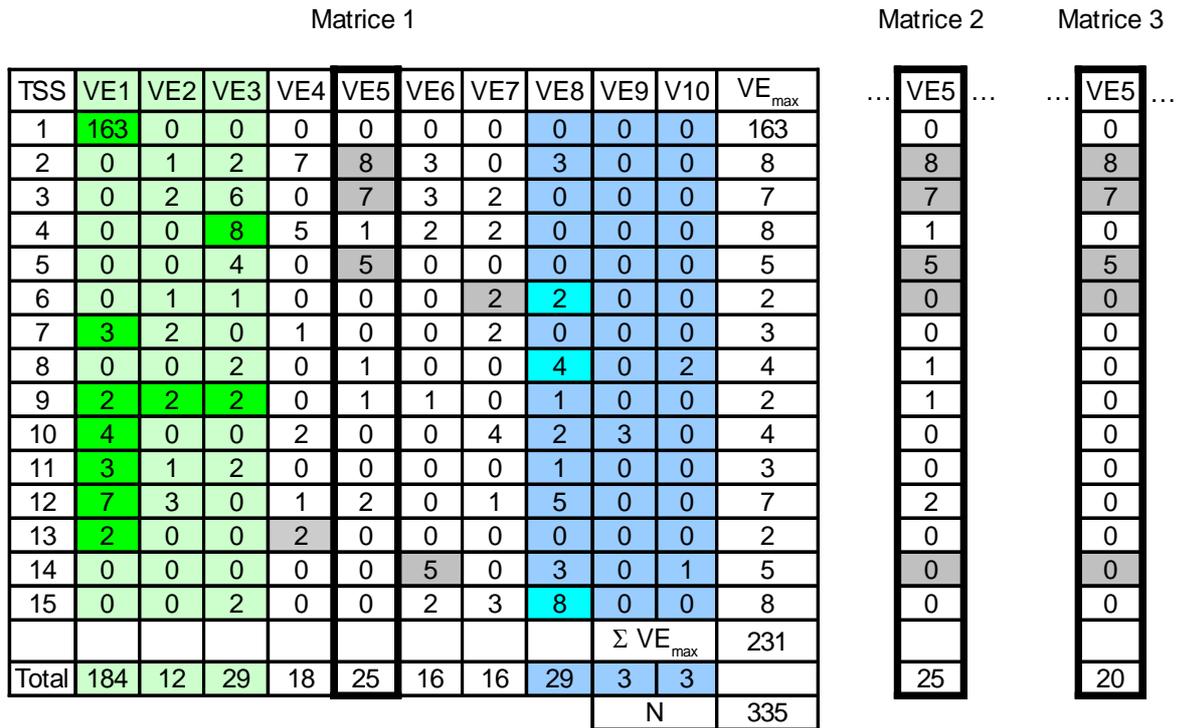


Figure 49 : Calcul des tests de succès (extrait de la base de données Hautes Chaumes)

La matrice 2 correspond, pour le type VE<sub>5</sub>, à la sélection des lignes de la colonne sur lesquelles le maximum se trouve dans le groupe considéré (V<sub>i</sub> devient V<sub>l</sub>).

	Variable cible			
TSS	V <sub>1</sub>		V <sub>k</sub>	V <sub>m</sub>
TSS <sub>1</sub>				
...				
TSS <sub>i</sub>			f <sub>ik</sub>	
TSS <sub>n</sub>				

Tableau 6 : Organisation générale de la matrice 2

Dans la matrice 3, les valeurs sélectionnées dans la matrice 2 sont conservées si elle correspond au maximum, les autres sont remplacées par 0 (V<sub>j</sub> devient V<sub>l</sub>).

	Variable cible			
TSS	V <sub>1</sub>		V <sub>l</sub>	V <sub>m</sub>
TSS <sub>1</sub>				
...				
TSS <sub>i</sub>			f <sub>il</sub>	
TSS <sub>n</sub>				

Tableau 7 : Organisation générale de la matrice 3

Nous avons donc :

a. Test primaire T

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n (\max_{j=1}^m (f_{ij}))}{N} \times 100 \quad (\text{Équation 40})$$

soit dans notre exemple  $T = \frac{231}{335} \times 100 = 68.9 \%$

b. Test secondaire T' pour V<sub>j</sub>

$$T'_{V_j} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ij}}{\sum_{i=1}^n f_{ij}} \times 100 \quad (\text{Équation 41})$$

soit pour VE<sub>5</sub>, dans notre exemple,  $T'_{VE_5} = \frac{20}{25} \times 100 = 80 \%$

c. Test secondaire global

$$T'_g = \frac{\sum_{j=1}^m (\sum_{l=1}^n f_{il})}{N} \times 100 \quad (\text{Équation 42})$$

soit pour notre exemple,  $T_g = \frac{260}{335} \times 100 = 77.6 \%$

## 5.2 Données et outils

### 5.2.1 La structure des bases de données

Les bases de données Pegase sont des fichiers « texte » à l'extension « .pgd ». Elles sont constituées en deux parties :

- Un en-tête contenant diverses informations
  - Les options qui seront utilisées pour mener à bien la procédure divisive,
  - Les variables présentes dans la bases de données ;
- Un corps renseignant pour chaque cellule les attributs de chaque variable.

Nous donnerons ci-dessous quelques éléments sur la structure d'une base de données Pegase de manière à faciliter la compréhension des principes de nos deux outils : XLPEG et Asc2PEG. Pour plus d'informations, il est nécessaire de se reporter au manuel d'utilisation du logiciel Pegase (Phipps 2002).

#### 5.2.1.1 L'en-tête

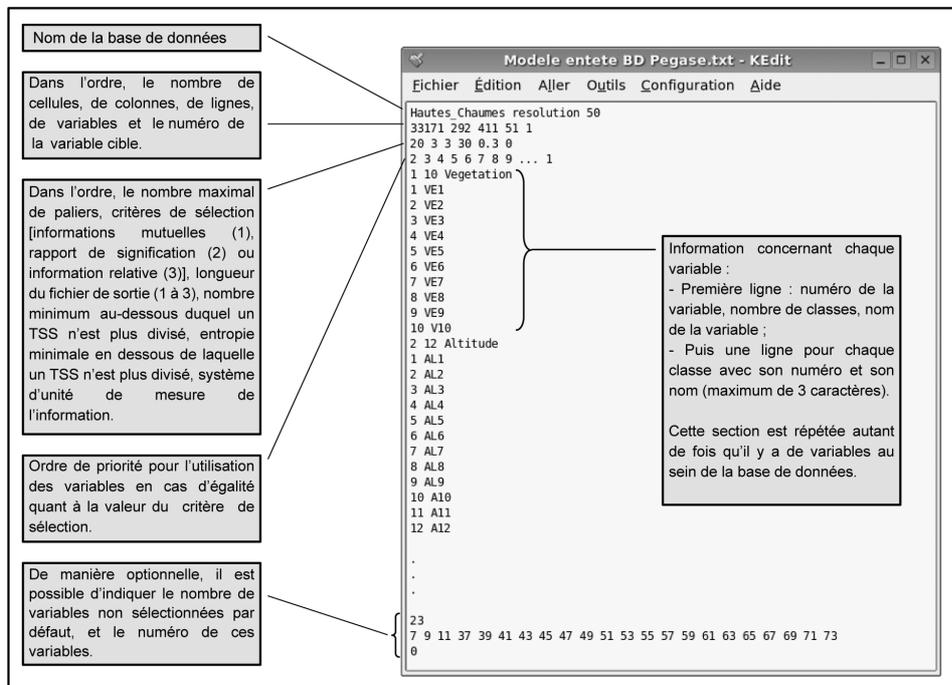


Figure 50 : Structure de l'en-tête d'une base de données Pegase

L'en-tête donne des informations sur le contenu de la base de données Pegase et sur les modalités d'exécution de la procédure divisive (figure 50). Les différents éléments renseignés correspondent à ceux décrits auparavant dans le paragraphe 5.1.3

Tous ces éléments sont récapitulés par Pegase à l'ouverture de la base de données au sein de la première fenêtre (figure 51). Il est alors possible de modifier les options avant de lancer le processus.

Figure 51 : Présentation des informations contenues dans l'en-tête par Pegase

### 5.2.1.2 Le corps

Le corps de la base de données contient lui les informations concernant chaque cellule du territoire étudié.

Il est composé d'autant de lignes qu'il y a de cellules. Chacune de ces lignes est synthaxée comme l'exemple ci-dessous :

```

...
155001 1 3 3 2 4 1 6 3 2 3 5 ...
149002 1 3 1 2 4 1 3 3 3 3 5 ...
150002 1 3 2 2 4 1 6 3 2 3 5 ...
151002 1 3 3 2 4 1 6 3 2 3 5 ...
152002 1 3 3 2 4 1 6 3 2 3 5 ...
153002 1 3 3 2 4 1 6 3 2 3 5 ...
154002 1 3 3 2 4 1 6 3 2 2 5 ...
155002 1 3 2 2 4 1 6 3 9 2 5 ...
156002 1 3 1 2 4 1 3 3 9 3 5 ...
...

```

Figure 52 : Extrait d'un corps de base de données Pegase

Elles sont constituées d'une série de chiffres correspondant respectivement à :

- Les coordonnées dans la cellule considérée, au sein de la grille de cellules, en prenant comme origine le coin supérieur gauche. La notation de ces coordonnées est de la forme :

$$(n^{\circ} \text{ de colonne} \times s) + n^{\circ} \text{ de ligne}$$

où :

- s est égal à 10 si le nombre de lignes est compris entre 0 et 9,
- s est égal à 100 si le nombre de lignes est compris entre 10 et 99,
- s est égal à 1000 si le nombre de lignes est compris entre 100 et 999
- s est égal à 10000 si le nombre de lignes est compris entre 1000 et 9999
- ...
- La classe représentée pour toutes les variables en tenant compte de l'ordre où elles apparaissent dans l'en-tête.

Pegase donne la possibilité de mettre en forme l'en-tête et d'insérer ensuite le corps réalisé au préalable à l'aide d'un éditeur de texte. Cependant, cet outil est apparu insuffisant pour une application avec nos données du fait du nombre de variables et de cellules.

Pour ces mêmes raisons, l'intégration de fichiers issus directement de systèmes d'information géographique est rapidement devenu une nécessité. C'est dans cette optique que nous avons développé deux outils : XLPeg et Asc2Peg.

## 5.2.2 Deux outils d'aide à la construction des bases de données

### Pegase

#### 5.2.2.1 Asc2Peg

#### 5.2.2.2 Présentation d'Asc2Peg

Asc2Peg (Mazagol et Mayoud 2005) est un outil logiciel permettant la mise en forme automatique du corps de la base de données Pegase à partir d'une série de fichiers au format d'échange ESRI ASCII Grid.

Il est utilisable sous environnement Windows. Ayant été développé en .Net, il nécessite cependant l'installation du paquet .NET Framework (de Microsoft). Il peut théoriquement être utilisé sous environnement Linux par le biais du logiciel Mono.

#### 5.2.2.3 Principe de fonctionnement d'Asc2Peg

##### 5.2.2.3.1 Les fichiers d'entrée

Asc2Peg permet de structurer ces données pour une zone définie par  $n$  cellules organisées en  $c$  colonnes et  $l$  lignes à partir de fichiers d'échange ESRI ASCII Grid. Ces fichiers ascii concernent une même zone d'étude et doivent tous posséder un même nombre  $c$  de colonnes et  $l$  de lignes. Ils ont donc tous la même résolution. Les valeurs NoData doivent être égales à -9999 et l'en-tête de ces fichiers doit être de la forme :

```
ncols      440
nrows     742
xllcorner 706397
yllcorner 2047072
cellsize   50
NODATA_value -9999
```

Les données doivent apparaître tout de suite après (à la sixième ligne), séparées par des espaces.

Le programme va procéder à une série de vérifications :

- que les 6 lignes d'en-tête existent dans chaque fichier : ncols, nrows, xllcorner, yllcorner, cellsize et NODATA\_value ;
- que les nombres de colonnes et de lignes « ne dépassent pas les bornes » : Si  $nbc\text{ol} \leq 0$  ou  $nbc\text{ol} > 1\,000\,000$  ou  $nbl\text{ig} \leq 0$  ou  $nbl\text{ig} > 1\,000\,000$  alors échec (le nombre maximum de cellules pour un fichier ascii en entrée est donc de un million) ;
- que tous les fichiers sélectionnés ont le même nombre de lignes et colonnes (cette vérification se fait uniquement par rapport aux nbc\text{ol} et nrows fournis en en-tête) ;
- que les nombres de colonnes et lignes fournis en en-tête correspondent bien aux nombres de lignes et colonnes réellement contenues dans le fichier ;
- que le nombre de fichiers sélectionnés au total est inférieur ou égal à 10000.

Si toutes ces conditions sont réunies, Asc2Peg peut alors créer le fichier \*.pgd

#### 5.2.2.3.2 Le fichier de sortie format .pgd

Le fichier créé comporte autant de colonnes qu'il y a de fichiers ascii en entrée. Chacune de ces colonnes correspond à un de ces fichiers. Leur ordre correspond à celui dans lequel ils ont été entrés dans le logiciel. Il intègre une autre colonne placée en premier, qui correspond aux coordonnées des cellules dans la grille.

D'autre part, il contient autant de lignes qu'il y a de cellules. Leur ordre correspond à celui des cellules, par ligne, à partir de la cellule supérieure gauche jusqu'à la cellule inférieure droite.

Pour expliquer le principe de création des coordonnées, nous avons pris l'exemple suivant :

1	2	3	4	5	6	7	8	3	3	3	2	3	6	3	10
9	10	11	12	13	14	15	16	9	3	3	4	1	1	9	10
17	18	19	20	21	22	23	24	8	7	7	1	1	2	9	9
25	26	27	28	29	30	31	32	2	6	2	1	2	7	9	9
33	34	35	36	37	38	39	40	5	3	2	4	4	3	3	1
41	42	43	44	45	46	47	48	3	5	5	10	10	10	4	8
49	50	51	52	53	54	55	56	4	5	5	10	10	9	4	6
57	58	59	60	61	62	63	64	3	7	3	9	10	6	3	4
65	66	67	68	69	70	71	72	5	6	6	6	6	7	1	2
73	74	75	76	77	78	79	80	3	7	5	7	7	8	9	8
81	82	83	84	85	86	87	88	8	2	8	8	5	6	8	8
89	90	91	92	93	94	95	96	8	9	1	9	3	9	5	6
97	98	99	100	101	102	103	104	9	8	9	10	1	2	3	10

Numéros des cellules du raster

Attributs des cellules du raster

Chaque fichier « grid » possède  $c$  colonnes (ici 8) et  $l$  lignes (ici 13). Chacune des  $N$  (ici 104) cellules est localisée par un numéro  $n$  (ici de 1 à 104)

Ces cellules peuvent être localisées par leurs coordonnées (X, Y) où :

$$Y = \left[ \frac{n-1}{c} \right] + 1$$

(NB : on note  $[x]$  la partie entière de  $x$ )

de telle sorte que, dans notre exemple :

- pour la cellule 1 :  $Y = \left[ \frac{1-1}{8} \right] + 1 = 0 + 1 = 1$
- pour la cellule 20 :  $Y = \left[ \frac{20-1}{8} \right] + 1 = 2 + 1 = 3$
- pour la cellule 40 :  $Y = \left[ \frac{40-1}{8} \right] + 1 = 4 + 1 = 5$
- pour la cellule 101 :  $Y = \left[ \frac{101-1}{9} \right] + 1 = 12 + 1 = 13$

et

$$X = n - (c(Y - 1))$$

de telle sorte que, dans notre exemple :

- pour la cellule 1 :  $X = 1 - ((1-1) \times 8) = 1$
- pour la cellule 20 :  $X = 20 - ((3-1) \times 8) = 4$
- pour la cellule 40 :  $X = 40 - ((5-1) \times 8) = 8$
- pour la cellule 101 :  $X = 101 - ((13-1) \times 8) = 5$

Asc2Peg met alors en forme les coordonnées des cellules comme étant :

$$(X \times s) + Y \text{ où :}$$

$$s = 10 \quad \text{si } 0 < l < 9$$

$$s = 100 \quad \text{si } 10 < l < 99$$

$$s = 1000 \quad \text{si } 100 < l < 999$$

$$s = 10000 \quad \text{si } 1000 < l < 9999$$

...

de telle sorte que, dans notre exemple :

- pour la cellule 1 :  $(1 \times 100) + 1 = 101$
- pour la cellule 20 :  $(4 \times 100) + 3 = 403$
- pour la cellule 40 :  $(8 \times 100) + 5 = 805$
- pour la cellule 101 :  $(5 \times 100) + 13 = 513$

### 5.2.2.3.3 Présentation de l'interface graphique d'Asc2PEg

Il est à noter qu'une cellule non renseignée pour une variable (NoData) sera représentée, au sein du fichier « \*.pgd », par une ligne incomplète non reconnue par

Pegase. Les supprimer (en cochant l'option prévue à cet effet) dès la mise en place de la base de données permet d'obtenir un fichier moins lourd.

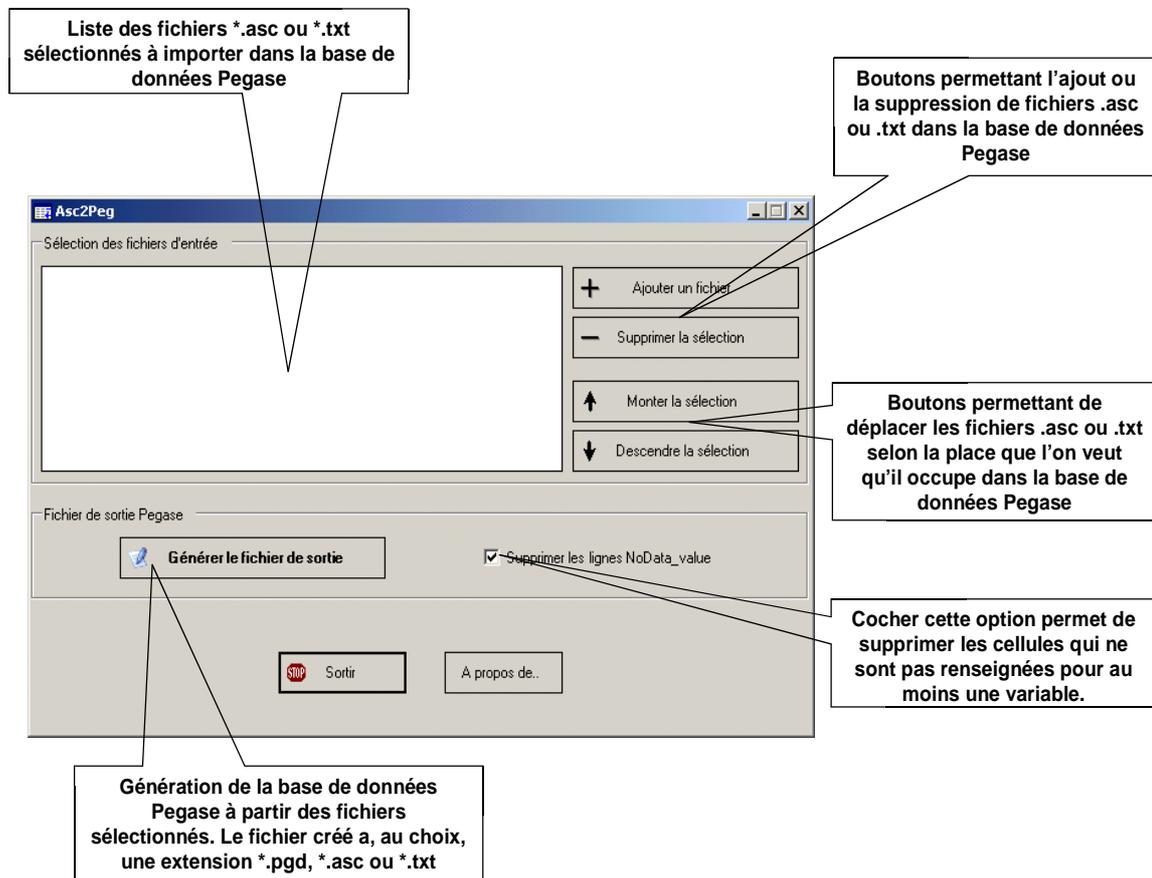


Figure 53 : L'interface graphique d'Asc2Peg

#### 5.2.2.4 XLPEg : outil de structuration des en-têtes

XLPEg (Mazagol 2005) se présente sous la forme d'un classeur Microsoft Excel. Ce dernier comprend 6 feuilles de calcul que l'utilisateur parcourt successivement et remplit en fonction des indications qui lui sont données. Il permet également de performer un rapide diagnostic permettant de repérer certaines erreurs couramment rencontrées.

La feuille d'introduction permet de rentrer tous les paramètres nécessaires au déroulement du processus Pegase. L'étape suivante consiste à fournir à XLPEg la base de données qui a au préalable été construite avec Asc2Peg. Ceci va permettre d'automatiser le

codage des variables. C'est également lors de cette étape que va se performer le diagnostic de la base de données. XLPeg nommera les variables dont le reclassement est incorrect et celle comportant plus de 30 classes (au delà, il y a des risques d'échec dans l'exécution de Pegase).

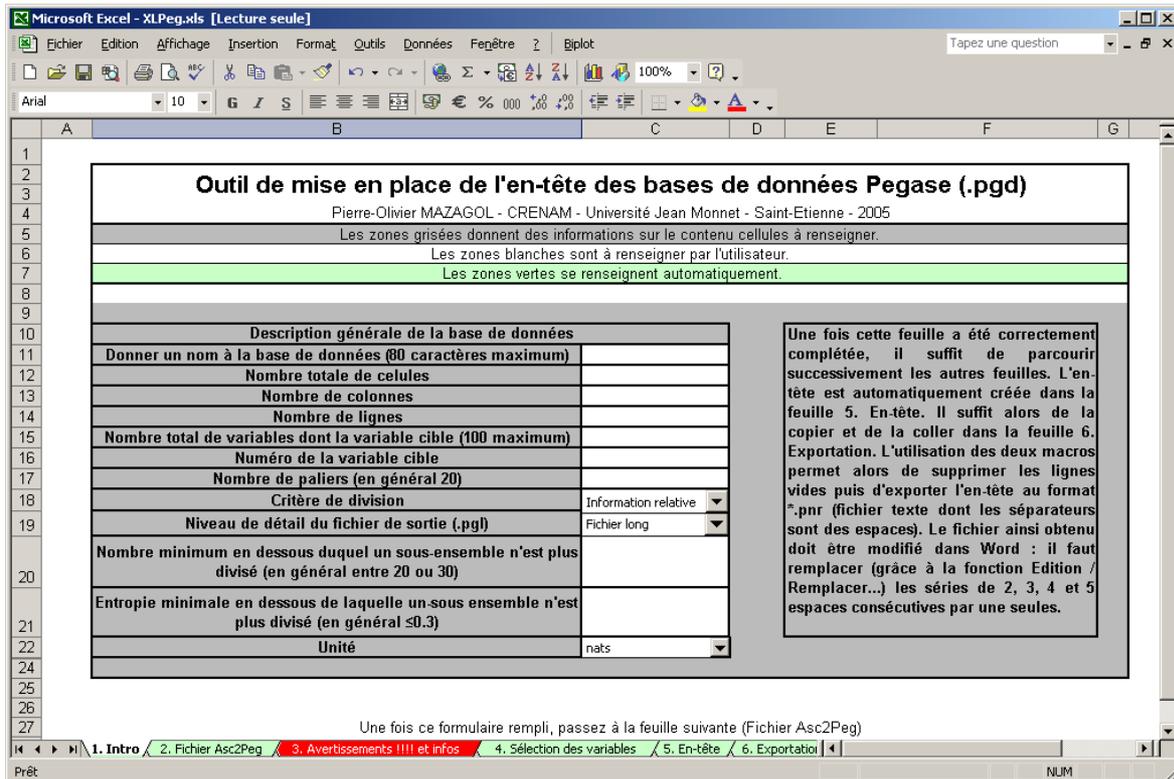


Figure 54 : Capture de la première feuille de XLPeg

Outre ceux fournis dans la première feuille, trois éléments sont à renseigner : le nom complet des variables, leur ordre de priorité et un code de une à deux lettres, en fonction du nombre de classes (rappelons que le code de chaque variable ne doit pas dépasser trois caractères). Le choix de ce code de une à deux lettres peut être complexe dans le cas de méta-bases de données (chaque classe de chaque variable devant avoir, au final, un code unique).

Une fois toutes les étapes complétées, une macro permet l'exportation automatique de l'en-tête au format \*.pnr (fichier texte : séparateurs espaces). Cette exportation crée malheureusement des séries d'espaces successives qu'il faut remplacer par des espaces simples en utilisant un éditeur de texte.

Nous avons également développé une alternative à XLPEG permettant son utilisation dans le tableur OpenOffice.org Calc (OOoPeg.ods). Il présente l'avantage de ne pas créer ces espaces multiples lors de l'exportation. Mais il possède encore quelques imperfections liées aux différences de syntaxe entre les formules Excel et OOoCalc. En effet, un grand nombre de formules et de requêtes logiques sont intégrées à XLPEG (et stockées dans une feuille de calcul cachée) et la détection des conflits entre les deux tableurs n'a pas encore été menée à son terme.

Enfin, une limite affecte XLPEG. Elle concerne le nombre maximal de cellules, les feuilles de calcul Excel ne pouvant posséder au maximum que 65536 lignes. Ainsi, au-delà de 65527 cellules, il n'est plus possible d'utiliser l'outil. Pour palier à ce problème, nous avons développé une variante d'XLPEG, appelée XXLPEG, qui automatise nettement moins la mise en place de l'en-tête puisque l'on ne fournit pas la base de données. L'utilité de cette variante reste cependant fort appréciable.

Une fois l'en-tête créée avec l'un de ces outils, il suffit alors de l'intégrer au début de la base de données.

### 5.2.3 Gestion des données

L'hétérogénéité des données mises en jeu dans nos bases de données se double de la multiplicité des logiciels et donc des formats utilisés. Cela nous a conduit à mettre en place une stratégie d'organisation des données (figure 55) plaçant Arcgis comme logiciel centralisateur et les autres outils comme applications satellites.

Il est certain que la place d'Arcgis aurait pu être occupée par un autre logiciel tel Grass par exemple. Mais notre choix a été fait dans l'optique d'une utilisation par des gestionnaires, ces derniers étant, pour l'instant, plus familiarisés avec les logiciels commerciaux.

De plus, la collecte des données s'avère longue et la maîtrise des différents outils mis en jeu est nécessaire. Cela peut donc s'avérer être un frein à l'utilisation de la méthode. Il en va de même avec le choix du format « raster », les gestionnaires étant nettement plus familiarisés avec le format « vecteur ».

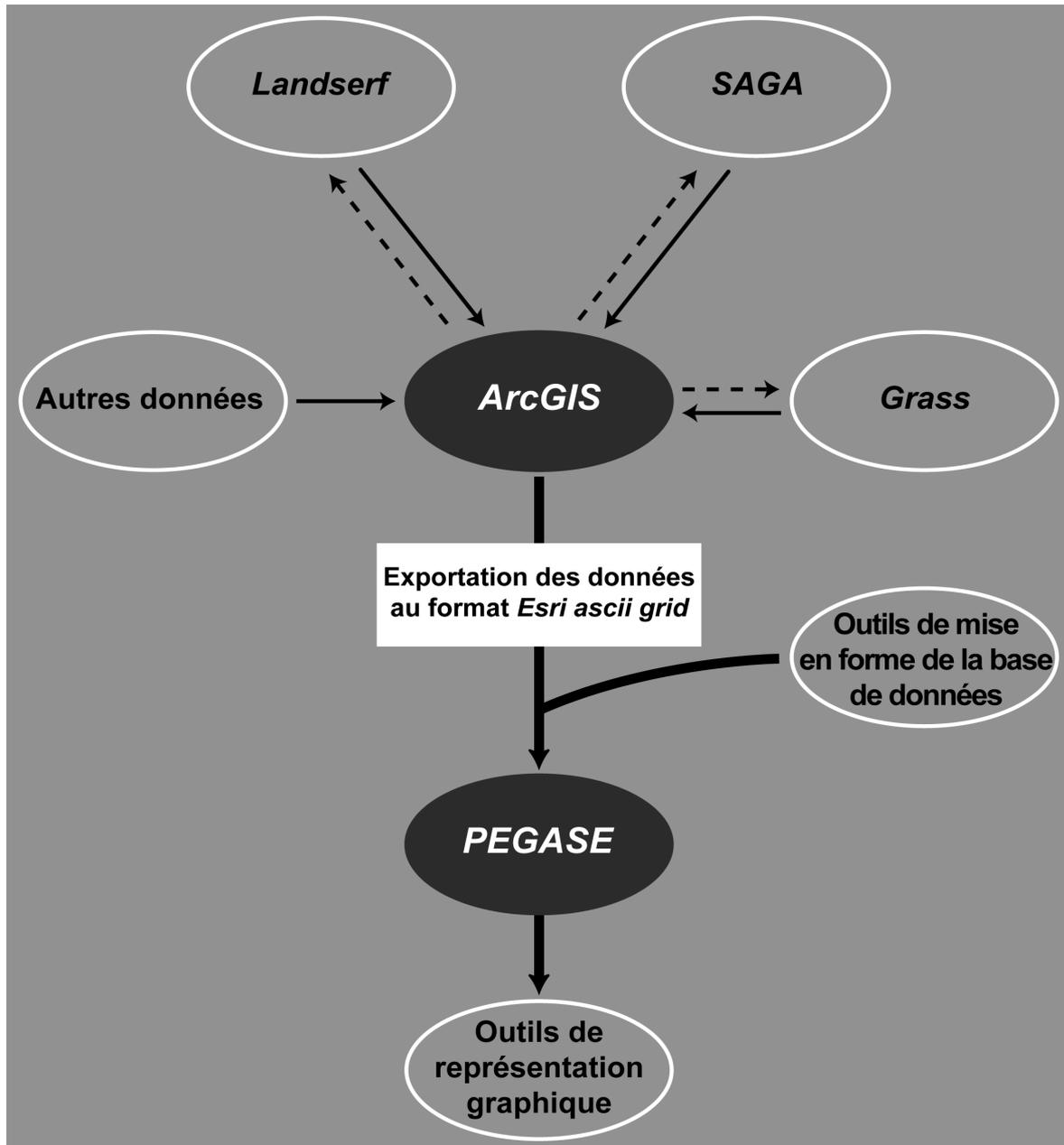


Figure 55 : Organisation des données dans l'optique de la mise en place d'une base de données Pegase

Quoi qu'il en soit, Pegase mériterait d'être intégré plus solidement encore au sein de coeur de systèmes d'information géographique. Il est ainsi envisageable d'imaginer le développement de l'outil en temps que extension ou module de logiciels SIG tels qu'ArcGis ou Grass.

## 5.2.4 Présentation des résultats

### 5.2.4.1 Un outil de représentation graphique : Gnuplot

Si Pegase fournit des représentations graphiques de ses résultats, ces dernières ne peuvent pas être exportées. Pour pouvoir les présenter, il faut réaliser des captures d'écran qui sont de piètre qualité.

Pour pallier ce problème, nous avons utilisé le logiciel libre Gnuplot 4.0 qui permet de tracer des graphiques exportables au format vectoriel et assurant ainsi un meilleur rendu.

Autre avantage, il permet de tracer des graphiques de différents types en deux et surtout en trois dimensions, ce qui présente un intérêt dans le cadre de notre travail, au vu la taille de nos bases de données.

Ces graphiques seront réalisés à partir des informations présentes dans le fichier de sortie Pegase (\*.pgl).

### 5.2.4.2 Un outil statistique : Biplot

Pour des raisons similaires à celles évoquées ci-dessus, l'exploitation des résultats de l'analyse des correspondances (AFC) effectuée par Pegase n'est pas toujours chose facile, surtout dans le cas d'un nombre important de traitements.

De plus, pour des bases de données de grande taille, la fonction présente des bugs. Or, cet outil peut se révéler intéressant en complément des résultats fournis à l'issue de l'algorithme.

Nous avons donc cherché un outil simple permettant la réalisation d'analyses des correspondances et permettant la mise en place de diagrammes de double projection. Notre choix s'est porté sur le logiciel gratuit « Biplot » (Lipkovich et Smith 2001). Il s'agit d'une macro élaborée pour Excel. Elle permet de dessiner des graphiques issus des résultats de plusieurs types d'analyses dont l'analyse des correspondances (mais également d'analyses en composantes et plusieurs types d'analyses canoniques).

L'utilisation de « Biplot » s'est faite à partir du tableau « fréquences des TSS par classes de la variable cible » (tableau 3) qui se trouve dans le fichier de sortie de chaque analyse Pegase (\*.pgl).

À partir des données finales (les TSS et les fréquences associées des types de couvertures), elle montre les relations entre ces deux entités (relations des types de couverts entre eux, entre ces derniers et les TSS et, finalement entre TSS). Ces relations sont visualisées par des graphiques où chacun des éléments est figuré par un point. La proximité entre deux de ces points exprime le degré de similitude soit :

- entre deux types de couvert ;
- entre deux TSS ;
- entre un type de couvert et un TSS.

Le plus important est que les axes de cette représentation graphique sont des dimensions indépendantes qui sous-tendent les variations globales entre tous ces éléments. Très souvent, ces axes représentent des gradients écologiques qui contrôlent la distribution spatiale des types de couverts végétaux.

La similitude entre deux types de couverts signifie évidemment qu'ils sont en général tributaires des mêmes types de milieux (on peut dire qu'ils ont des « niches paysagiques » assez voisines). Entre deux TSS, une similitude veut dire qu'ils ont des profils de fréquences semblables vis-à-vis des types de couverts. Enfin, entre un TSS et un type de couvert, la proximité signale que ce type de couvert est fréquent dans le TSS.

Cependant, au vu du nombre de TSS créés dans le cadre de nos bases de données et ce, surtout aux fortes résolutions, il sera difficile d'interpréter leur proximité. Nous nous limiterons donc aux types d'occupation du sol.

A chaque graphique sera associé un deuxième correspondant à la distribution des valeurs propres associées à chaque axe.

## 5.3 L'originalité de notre étude face à celles déjà menées

Pegase permet de cerner l'organisation du paysage, une notion intuitive qui restait à définir au plan théorique et méthodologique. Notre but est d'établir comment les contraintes que l'on découvre entre variables du milieu et expression de ce milieu peuvent être traduites en principes d'aménagement et de conservation du paysage.

Notre approche multi-échelle constitue une innovation puisque aucune recherche n'a été menée en ce sens.

De plus, notre approche permet d'utiliser le processus dans un contexte « système d'information géographique », domaine bien adapté aux possibilités de la méthode.

D'un point de vue technique, nos bases de données sont de tailles nettement plus importantes que celles utilisées jusqu'à présent et ont mis en évidence l'existence de limites non pas dans l'algorithme, mais dans son programme d'application. Notre travail a donc permis de tester le comportement du modèle et la performance du logiciel dans ces conditions particulières et, par l'intermédiaire de Michel Phipps, de le faire évoluer.

Notre travail est donc pleinement ancré dans un effort de développement du processus Pegase, tant sur le plan technique que sur celui de l'utilisation simple de l'algorithme.



## Chapitre 6 : Résultats : approche multiéchelles

À partir des données récoltées (chapitre 3.2), une méta-base de données au format Pegase (chapitre 5.2) peut être mise en place pour le territoire des Hautes Chaumes. L'algorithme Pegase (chapitre 5.1) peut alors lui être appliqué.

### 6.1 Préparation des données

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel Pegase dans un contexte multi-échelles. Plus précisément, nous souhaitons connaître les variations affectant les résultats en fonction d'une part de la résolution et d'autre part de l'étendue.

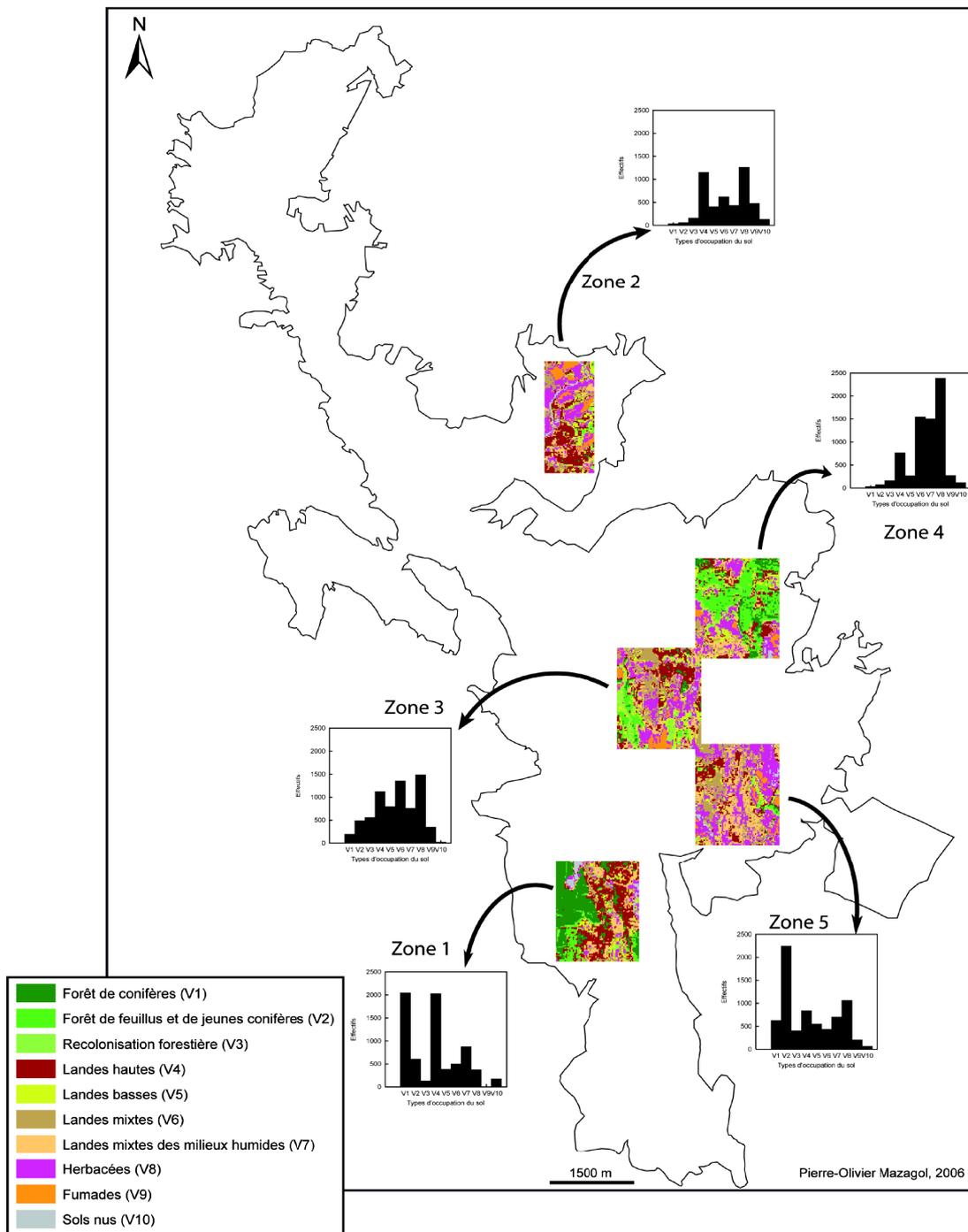
Mettre en place une telle méthodologie nécessite la résolution de trois problèmes :

- Puisque l'on veut procéder à une augmentation de l'étendue, il faut choisir des zones de taille réduite au sein du terrain d'étude. Quelles zones choisir ?
- Puisque l'on veut faire varier la résolution, quels seuils choisir ? Et quelle est la résolution d'origine des données ?
- Pegase n'acceptant que des classes catégorielles, il va nous falloir reclasser un certain nombre de variables. Quel type de reclassement réaliser ?

#### 6.1.1 Sélection des zones

Au sein du territoire des Hautes Chaumes, nous avons sélectionné cinq zones-tests. Leur choix a été réalisé à la résolution d'origine de la variable cible, l'occupation du sol, à savoir, 20 m. Ce choix est inhérent à une part d'aléatoire : les limites de ces zones n'ont en effet aucune signification, que ce soit d'un point de vue écologique, géomorphologique, agricole.

En revanche, cette sélection a été faite de manière à ce que la distribution et la fréquence des types d'occupation du sol soient différentes d'une zone à une autre. Chacune possède donc une « signature » qui lui est propre (carte 31).



Carte 31 : Localisation des 5 zones test de niveau I

Quatre zones (1, 3, 4 et 5) possèdent la même superficie. Cette dernière a été choisie afin que le nombre de cellules soit important aux hautes résolutions et suffisant aux plus faibles. D'autre part cette superficie se devait de ne pas être trop importante afin que d'avoir la possibilité d'augmenter l'étendue de la zone. La zone 2 possède cependant une superficie plus faible.

Les zones 3, 4 et 5 sont localisées dans la partie centrale des Hautes Chaumes. C'est à ce niveau que le domaine est le moins étroit et que l'augmentation de l'étendue des zones est la plus facilement réalisable. Ce sont ces zones qui vont donc permettre de faire jouer la deuxième facette de la notion d'échelle : l'étendue.

Ces trois zones se sont vu attribuer un « niveau » correspondant à leur taille et donc à leur étendue. Les zones 3, 4 et 5 sont donc considérées comme étant de niveau I, c'est-à-dire de faible étendue, et sont appelées respectivement z1nI, z3nI, z4nI. À partir de ces dernières, nous avons procédé à une augmentation de l'étendue, en créant des zones de niveau II, III et IV (figure 56).

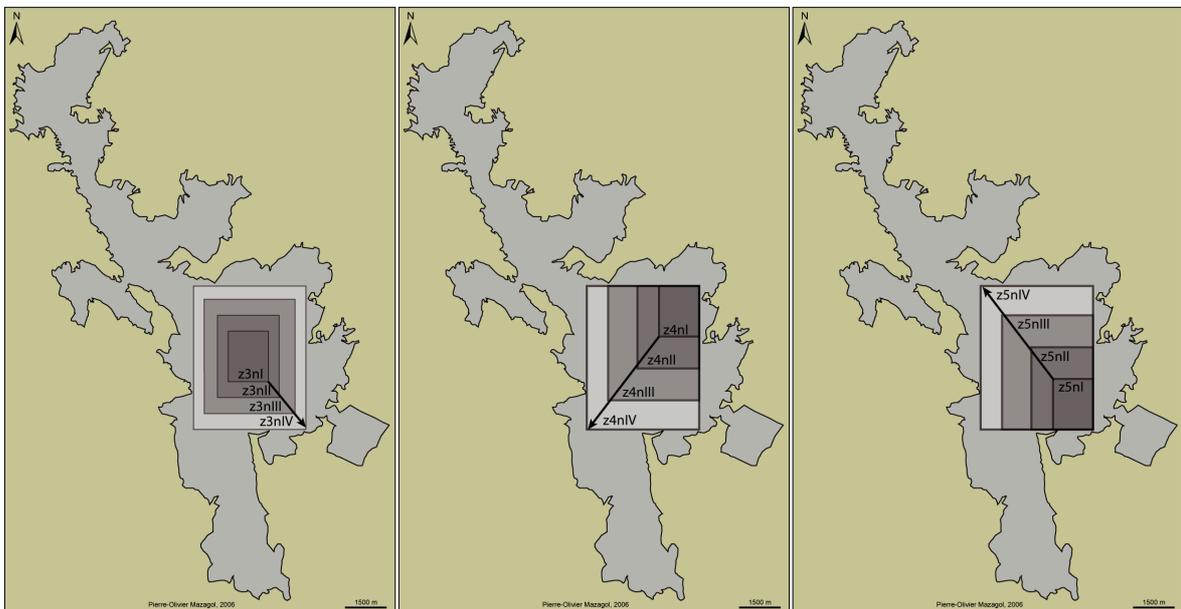


Figure 56 : Augmentation de l'étendue à partir de la zone 5

On remarque que les zones z3nIV, z4nIV et z5nIV sont identiques... Elles correspondent à une zone que nous appellerons z6nIV.

Enfin, la zone 2 possède une forme ainsi qu'une étendue différentes des autres zones (de niveau I).

## 6.1.2 Description des zones de niveau I

### 6.1.2.1 Description de la zone 1

La zone 1 mesure 1900 m dans le sens nord-sud pour 1500 m, soit une superficie de 285 ha. Elle est située à cheval sur les communes de Grandrif et de Saint-Anthême dans le Puy de Dôme.



*Figure 57 : Visualisation 3D de la zone 1*

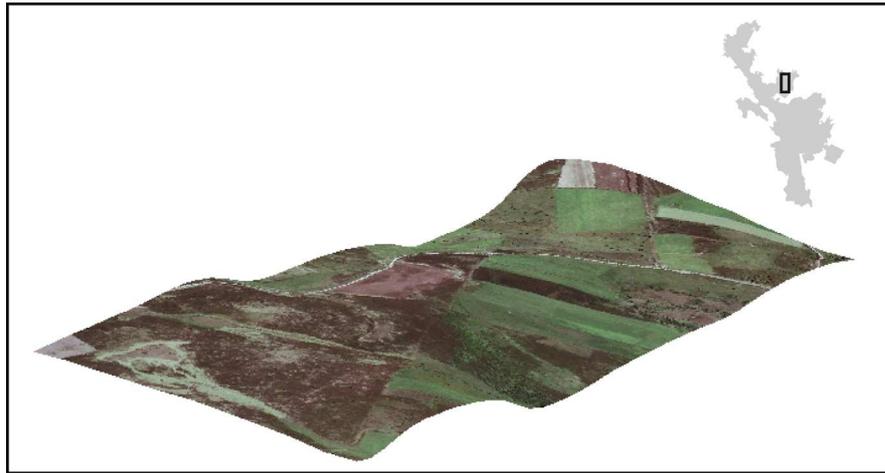
Cette zone est localisée dans la partie sud des Montagnes des Allebasses, plus précisément au niveau de leur partie la plus élevée. Son point culminant est à 1423 m pour une amplitude d'environ 100 m. Elle ne présente pas de relief réellement contrasté. Ce dernier est principalement marqué par la naissance de trois cours d'eau dont le Ruisseau des Pradaux.

On est bien dans la partie sommitale des Hautes Chaumes avec des expositions globalement équilibrées entre celles à dominance ouest et celles à dominance est.

Cette zone est majoritairement occupée par les formations forestières (39%) et par les landes (53%). On remarque enfin, une large zone de « sol nu » au nord-ouest

### 6.1.2.2 Description de la zone 2

La zone 2 possède une taille différente de celle des autres zones. En effet, elle mesure 2100 m dans le sens nord-sud pour 900 m, soit une superficie de 189 ha. Elle est située sur la commune de Sauvain dans la Loire.



*Figure 58 : Visualisation 3D de la zone 2*

Elle possède un relief peu marqué avec une altitude maximale de 1362 m pour une amplitude d'environ 80 m. Elle est traversée par le Ruisseau de Cravassa et voit naître le Ruisseau de La Planchette.

Du point de vue de sa localisation, elle présente la caractéristique d'être enclavée et entourée par des zones d'altitudes plus basses et dominées par les forêts.

Il s'agit d'une zone essentiellement recouverte par des landes (55%) et de pelouses (27% d'herbacées et 10% de fumades).

### 6.1.2.3 Description de la zone 3

Cette zone possède exactement les mêmes dimensions que la zone 1. Elle se situe, pour sa plus grande partie, sur la commune de Saint-Anthème dans le Puy-de-Dôme. Le nord-est fait partie de celle de Roche dans la Loire.

Elle occupe une position centrale au coeur des Hautes Chaumes. Son relief est marqué par la présence de l'Ance, rivière dont la source se situe à quelques centaines de

mètres au nord de la zone. Le vallon qu'elle y creuse du nord au sud est bien visible dans le paysage ainsi que celui de deux de ses affluents.

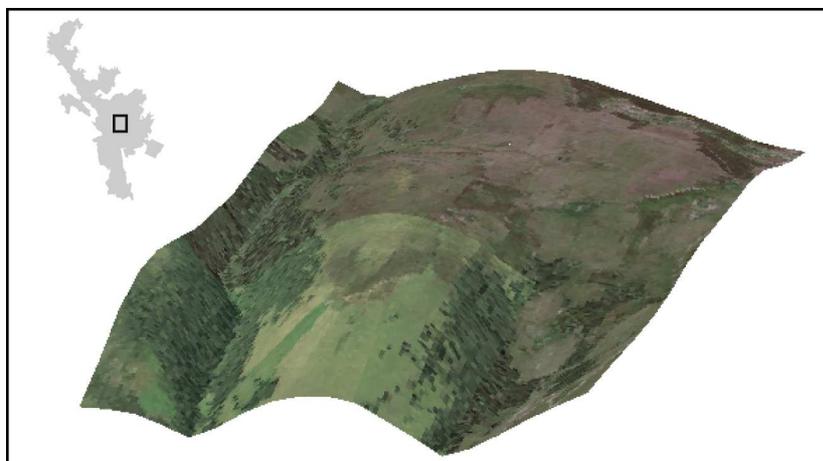


Figure 59 : Visualisation 3D de la zone 3

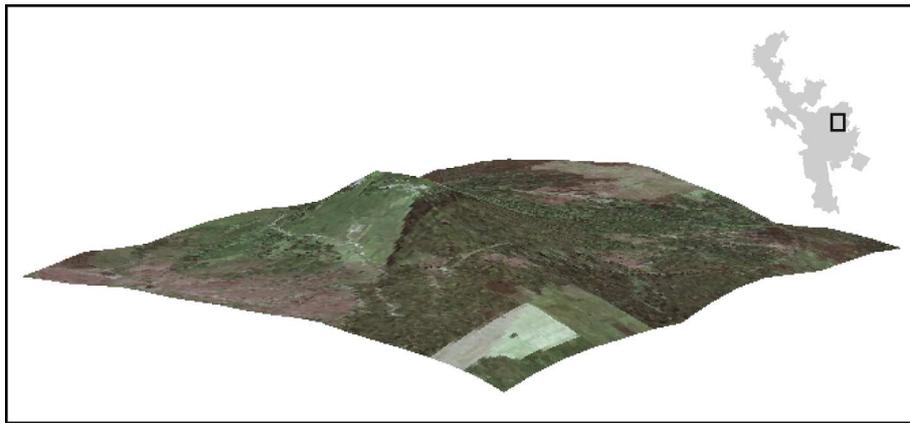
Le relief est donc plus marqué que ceux des deux zones précédemment décrites. Le point culminant est à 1392 m pour une amplitude d'environ 160 m.

Les landes sont, là encore, majoritaires à 57% associées aux pelouses (21% pour les herbacées et 5% pour les fumades). Les forêts sont, elles, localisées principalement en fond de vallons.

#### 6.1.2.4 Description de la zone 4

De mêmes dimensions que la zone précédente, elle est localisée principalement sur la commune de Roche et, dans son tiers nord-est, sur celle de Saint-Bonnet-de-Courreau dans la Loire.

Elle présente une topographie peu marquée si ce n'est au niveau d'une croupe qui n'est autre que la Roche Gourgon. Ainsi, son altitude culmine à 1420 m pour une amplitude d'environ 150 m. Cette zone voit naître un affluent du Ruisseau du Chorsin ainsi que le Ruisseau de la Goutte Fièrè.



*Figure 60 : Visualisation 3D de la zone 4*

Au niveau de l'occupation du sol, elle se distingue par une prédominance de la forêt (57%) au détriment surtout des landes. Au sud de la roche, il faut noter la présence d'un vaste complexe tourbeux.

#### 6.1.2.5 Description de la zone 5

Dernière zone sélectionnée, elle possède elle aussi les mêmes dimensions que la zone 1. Elle se situe intégralement sur la commune de Saint-Anthème. Elle possède un relief relativement marqué avec un point culminant à 1393 m pour une amplitude de 190 m environ.



*Figure 61 : Visualisation 3D de la zone 5*

Elle voit naître, dans sa moitié ouest, plusieurs affluents de l'Ance et est parcourue du nord à l'est par l'Ancette, ruisseau prenant sa source un peu au nord de la zone.

La forêt ne représente que 4% de l'occupation du sol et se concentre dans le fond du vallon de l'Ancette. Le reste de la zone est majoritairement recouvert de landes (57%) et d'herbacées (33% ).

### 6.1.3 Choix des résolutions utilisées

Si l'on considère leur nature, les données en notre possession peuvent être classées dans trois groupes :

- Celles au format raster, qui possèdent donc une résolution d'origine (l'occupation du sol : 20 m) ;
- Celles au format raster dont la résolution dépend de la donnée d'origine (les variables dérivées du MNT) ;
- Celles au format vecteur dont la résolution dépendra du choix de l'utilisateur lors de leur conversion au format raster.

Dans le cadre de notre recherche, les données raster possèdent deux résolutions d'origine : 20 m pour la couverture végétale et 50 m pour le MNT IGN.

Le choix des résolutions dépend également de l'étendue de la zone d'étude. Nous avons opté pour une échelle de résolution allant de 20 à 100 m, considérant que :

- au-delà de 100 m, la perte d'information serait trop importante, notamment pour les zones de niveau I ;
- en-deçà de 20 m, le gain d'information ne serait pas significatif.

### 6.1.4 Reclassement des variables quantitatives

Un certain nombre de variables incluses dans la base de données Hautes Chaumes sont de type quantitatif. Un reclassement de ces dernières a donc été nécessaire afin de les intégrer au sein des bases de données Pegase.

Ce reclassement a été effectué sur la totalité du domaine des Hautes Chaumes afin que dans chaque zone, quel que soit sa localisation et/ou son niveau, une classe ait un code et un seul. Mais une telle stratégie de reclassement présente des limites. En effet, plus l'étendue de la zone est importante, plus la probabilité que l'amplitude de certaines variables soit forte est importante. Dans ce cas, le nombre de classes peut être très élevé, ce qui rend l'exécution de Pegase périlleuse. De plus, dans le cas des variables estimées par noyaux de cellules, la taille de ces derniers influe sur l'amplitude de la valeur calculée.

Il nous a donc fallu jongler entre deux impératifs :

- un nombre de classes raisonnable ;
- un reclassement ayant une signification pour variable considérée.

Nous avons opté pour les reclassements présentés dans le tableau ci dessous (tableau 8).

<i>Variables</i>	<i>Reclassement par tranche de</i>
Altitude	50 m
Exposition	N, NE, E, SE, S, SO, O, NO
Pente	2,5 °
Courbures	Négative, nulle ou positive
Indice ADT	Accumulation, Transit ou Dispersion
Rugosité	4 m <sup>2</sup>
Relief local relatif	15 m
Radiation solaire	75 kWh/m <sup>2</sup>
Durée d'insolation	150 heures
Indice topographique	1 (unité arbitraire)
Distance aux tourbières	50 m
Distances au réseau hydrographique	50 m
Distance au talweg	50 m
Distance aux crêtes	50 m
Distance au réseau viaire	50 m
Distance aux zones humides	50 m

*Tableau 8 : stratégie de reclassement des variables*

### 6.1.5 Quelques compléments sur la présentations des résultats

Chaque zone sélectionnée a fait l'objet, pour chaque étendue et pour chaque résolution, de la construction de neuf bases de données Pegase. Ainsi, ce sont 108 bases de données qui ont été mises en place, puis traitées indépendamment à l'aide du logiciel.

Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à trois indicateurs fournis par Pegase : la redondance, la contribution et la spécificité, ainsi qu'aux résultats de l'analyse des correspondances effectuée à partir du tableau des fréquences des TSS par classe de la variable cible.

Les traitements ont été réalisés en utilisant les options suivantes :

- effectif minimum des TSS : 30 ;
- entropie minimale requise pour subdiviser un TSS : 0,3 ;
- Critère de sélection : information relative ;
- Nombre de paliers : 20.

Nous présentons également les résultats obtenus à l'aide des trois tests de succès que nous avons mis au point : un test primaire, un test secondaire (T') et un test secondaire global (T'<sub>g</sub>) en procédant aux regroupements *a priori*, présentés dans le tableau ci-dessous :

Code	Classes de végétation	Regroupement <i>a priori</i>
V1	Conifères	Forêts
V2	Feuillus et jeunes conifères	
V3	Recolonisation forestière	
V4	Landes hautes	Landes
V5	Landes basses	
V6	Landes mixtes	
V7	Landes mixtes des milieux humides	
V8	Herbacées	Autres
V9	Fumades	
V10	Sols nus	

Tableau 9 : Rappel du codage des types d'occupation du sol au sein des bases de données Pegase et des regroupements *a priori* en vue de l'application des tests de succès

Ainsi, nous avons regroupé des classes qui sont susceptibles d'être confondues par l'algorithme ou qui ont pu être sujettes à erreur lors de la mise en place de la cartographie de la végétation des Hautes Chaumes.

Par ailleurs, il est nécessaire de noter qu'en règle générale, avec une base de données à effectif important (au moins de l'ordre de 1000 unités spatiales), la disparité des résultats est relativement réduite. Celle-ci tend, au contraire, à augmenter avec la diminution de l'effectif de départ.

Cependant, dans un cas comme dans l'autre, se pose la question de l'évaluation des résultats de la procédure. De plus, un nombre de cellules supérieur à 1000 permet d'obtenir un nombre de divisions garantissant une courbe d'ajustement correcte.

L'augmentation de la résolution faisant diminuer le nombre de cellules, nous avons reporté, sur certains graphiques présentés, la limite critique au-delà de laquelle les résultats peuvent être mis en doute.

Concernant la contribution, seules les variables contribuant à au moins 5% de la négentropie ont été reportées. C'est à partir de cette valeur, que nous considérerons cette contribution comme significative.

Au sein des matrices de succès seront reportées les probabilités de prédictions justes (en grisé) et fausses. Seules les probabilités d'erreur supérieures ou égales à 10% (limite arbitraire) y figureront, les autres étant considérées comme aléatoires.

De plus, pour chaque zone, une matrice supplémentaire sera ajoutée, appelée « Matrice de succès après regroupement ». Il s'agit de la matrice de succès à la résolution 20 m tenant compte de regroupements opérés dans le cadre des tests de succès secondaires.

Pour minimiser le nombre de graphiques et par souci de synthèse, nous avons opté pour la mise en place de graphiques à trois dimensions permettant de représenter trois variables au lieu de deux.

Les résultats des différents traitements réalisés sur les différentes zones montrant une certaine homogénéité, et par souci de concision, nous présenterons, dans un premier

temps, de manière détaillée uniquement les résultats obtenus à partir de la zone 3 (figure 59) et de ses différents niveaux, soit 4 zones.

Ils s'organisent selon deux façons de considérer ces différentes zones :

- Les résultats sont décrits pour chaque niveau, indépendamment des autres, chaque zone étant alors considérée comme un paysage à part entière. Dans ce cas, seule l'influence de la résolution est prise en compte ;
- Chaque zone est considérée comme un niveau d'un seul et même paysage. Nous rajoutons alors l'influence de l'étendue à celle de la résolution.

Pour conforter et compléter les résultats obtenus dans les conditions nommées ci-dessus, nous présenterons, dans un second temps et de façon plus globale, ceux issus du traitement des autres zones.

## 6.2 Résultats obtenus pour chaque zone

### 6.2.1 Zone 3 de niveau I

#### 6.2.1.1 Évolution de la redondance

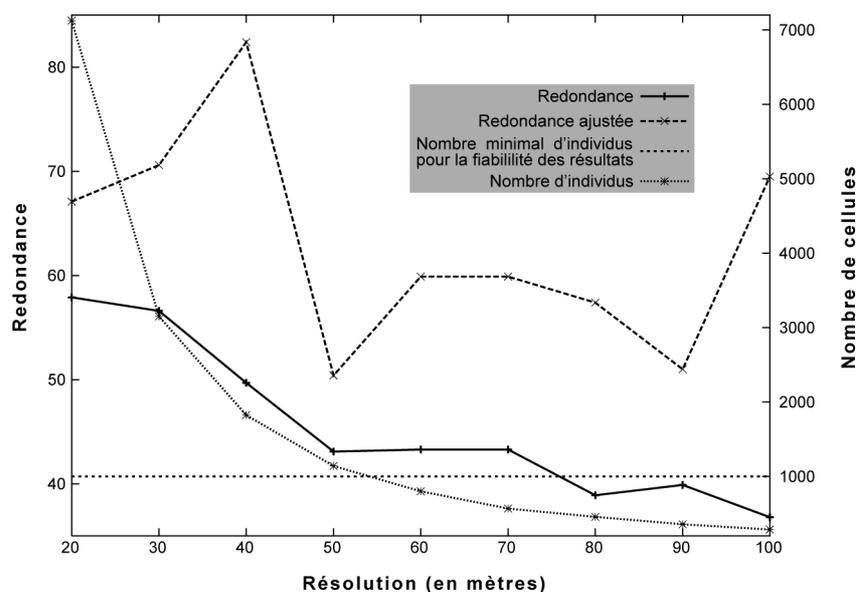
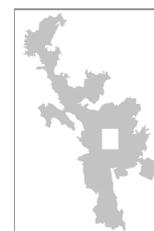


Figure 62 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I)

La diminution de la résolution est accompagnée par celle du nombre de cellules et le nombre d'individus devient insuffisant (inférieur à 1000) au-delà de 50 m (figure 62). Ainsi, aux résolutions les plus faibles (de 60 à 100 m), les résultats découlant de l'application de l'algorithme ne sont pas fiables. Il faut d'ailleurs noter que ce nombre de 1000 individus est donné comme une valeur approximative.

La redondance, de 57,9% à 20 m, n'est plus que de 43,1% à la résolution 50 m, soit une perte de 14,8% par rapport à la résolution 20 m. La redondance diminue donc avec la résolution. Cette diminution peut s'expliquer par l'existence, aux plus hautes résolutions, d'effets de voisinage atténués par l'augmentation de la taille des cellules et la diminution de leur nombre.

La redondance à 20 m est donc de 57,9% : l'ensemble des contraintes exercées par les variables explicatives sélectionnées ne représente que 57,9 % de l'entropie initiale.

L'occupation du sol est donc relativement bien déterminée par les descripteurs sélectionnés. Il s'agit en effet d'un résultat satisfaisant. Cependant, 42,1% de la négentropie n'est expliquée par aucune des variables sélectionnées. Ainsi, il est probable que nous ne possédons pas celles qui permettraient d'améliorer ce score.

### 6.2.1.2 Évolution de la complexité

Parallèlement à la redondance, on note une diminution de l'entropie environnementale correspondant à la complexité  $C$  du modèle (figure 63).

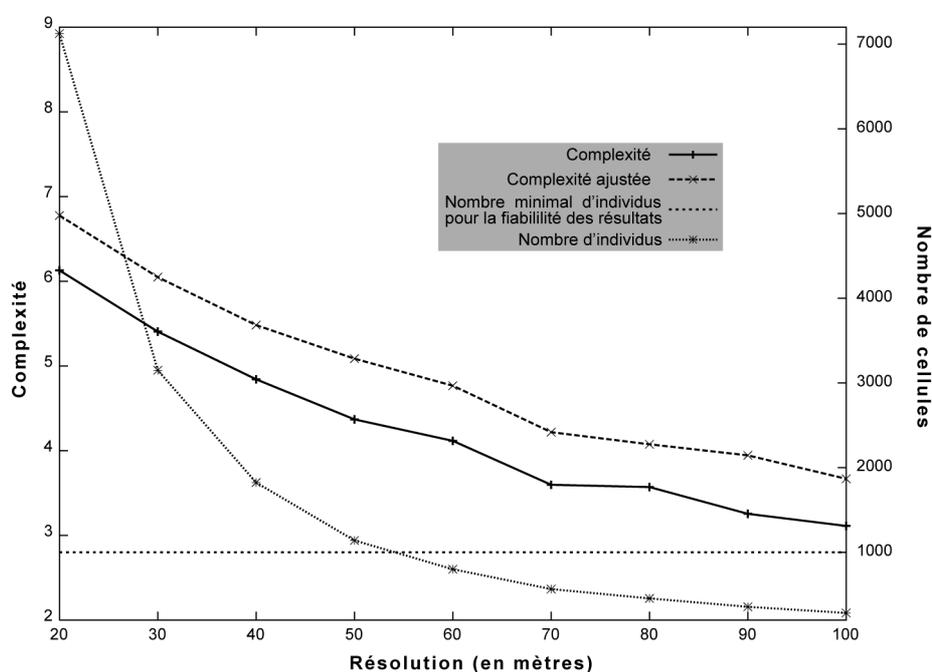


Figure 63 : Évolution de la complexité  $C$  en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I)

Ce comportement s'explique par le fait que la diminution du nombre de cellules est grand, induit un plus faible nombre de divisions au cours du processus et donc, une diminution de la complexité.

### 6.2.1.3 Évolution de la contribution

Un certain nombre de variables ont contribué de manière relativement importante à la négentropie (figure 64).

Elles peuvent être séparées en deux groupes : celles qui contribuent quelle que soit la résolution (grisées dans le tableau 10) et celles qui ne contribuent qu'à des résolutions données :

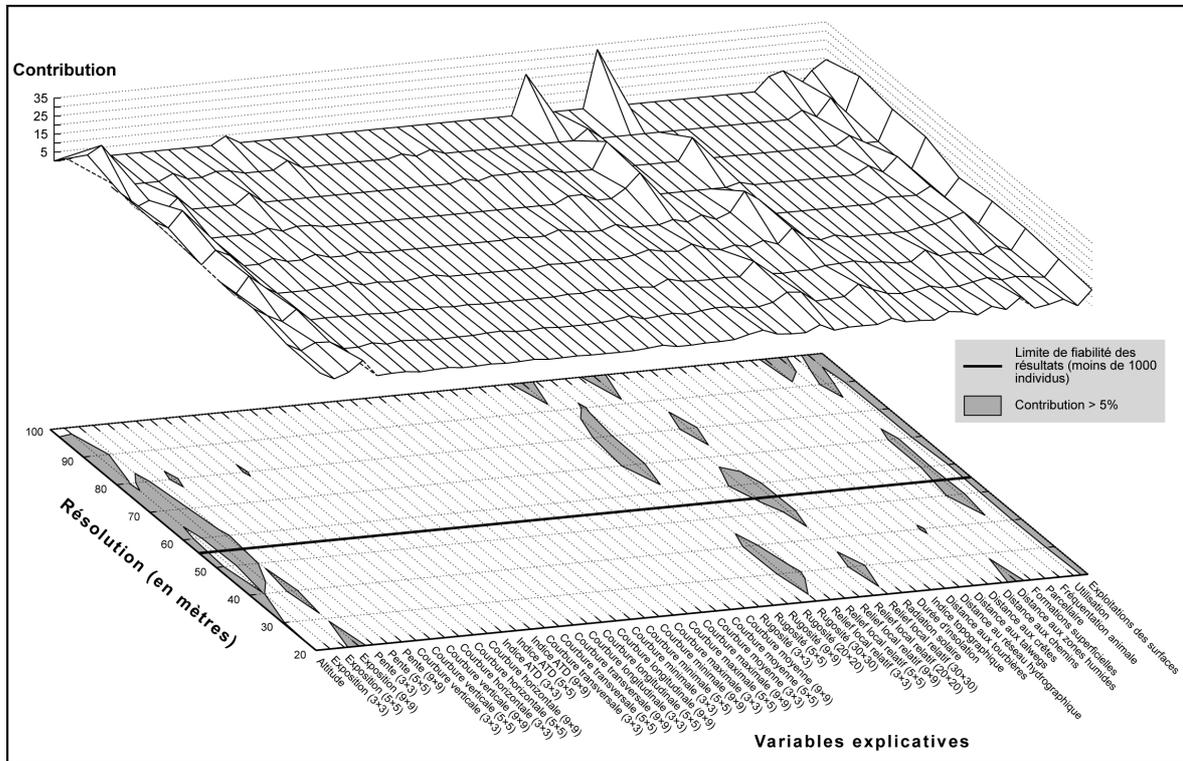


Figure 64 : Évolution de la contribution de chaque variable en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I)

	20 m	30 m	40 m	50 m
altitude				
exposition (3×3)				
exposition (5×5)				
exposition (9×9)				
rugosité du relief (30×30)				
relief local relatif (30×30)				
distance aux crêtes				
distance aux zones humides				
utilisation				
exploitation des surfaces				

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des variables dont la contribution est significative (zone 3 de niveau I)

Plusieurs facteurs physiques liés au relief sont impliqués dans la structuration du paysage de cette zone :

- L'altitude semble jouer un rôle prépondérant (20 m, la contribution est à peine inférieure à la limite que nous sommes fixée) ;
- L'exposition aussi joue un rôle important mais variant selon la taille de la fenêtre d'estimation prise en compte (3×3, 5×5 ou 9×9) et la résolution. Ainsi, plus la fenêtre est large, plus la variable agit à des résolutions variées. La rugosité du relief et le relief local relatif agissent de nouveau pour des tailles larges de fenêtres ;
- La distance aux crêtes ;
- La distance aux zones humides exprime la disponibilité de l'eau ;
- l'utilisation et l'exploitation des surfaces sont deux variables purement anthropiques indiquant une influence importante de la présence et du type de troupeaux.

#### 6.2.1.4 Évolution de la spécificité

La spécificité de chacune des classes de la variable cible (figure 65) est elle aussi influencée par la résolution. Rappelons que la spécificité d'une classe correspond à sa dépendance ou son indépendance vis à vis des combinaisons de variables explicatives. L'influence de la résolution est cependant différente selon la classe considérée. Les spécificités sont plus importantes à haute résolution.

On note que le graphique présente une forme « fer à cheval », les spécificités des deux types « forestiers » d'une part et des « fumades » et « sol nu » d'autre part, étant plus importantes. Il est bien évident que la forme même de cette configuration est circonstancielle puisqu'elle dépend de l'ordre dans lequel nous avons rangé les classes de couvert végétal, et que cet ordre est pour partie arbitraire.

Cependant cette observation est tout à fait fondée lorsqu'on la replace dans un contexte plus général. Michel Phipps (communication personnelle) a très souvent observé cette propriété et l'a attribuée à un effet de gradient. Selon les milieux, les couvertures du

sol peuvent former des gradients divers. Par exemple, dans le cas des couverts forestiers de la province du Manitoba au Canada (Phipps 2001), on observe un gradient climatique (de la toundra à la prairie). Si les types avaient été ordonnés selon ce gradient, on aurait ainsi vu une structure en U très nette.

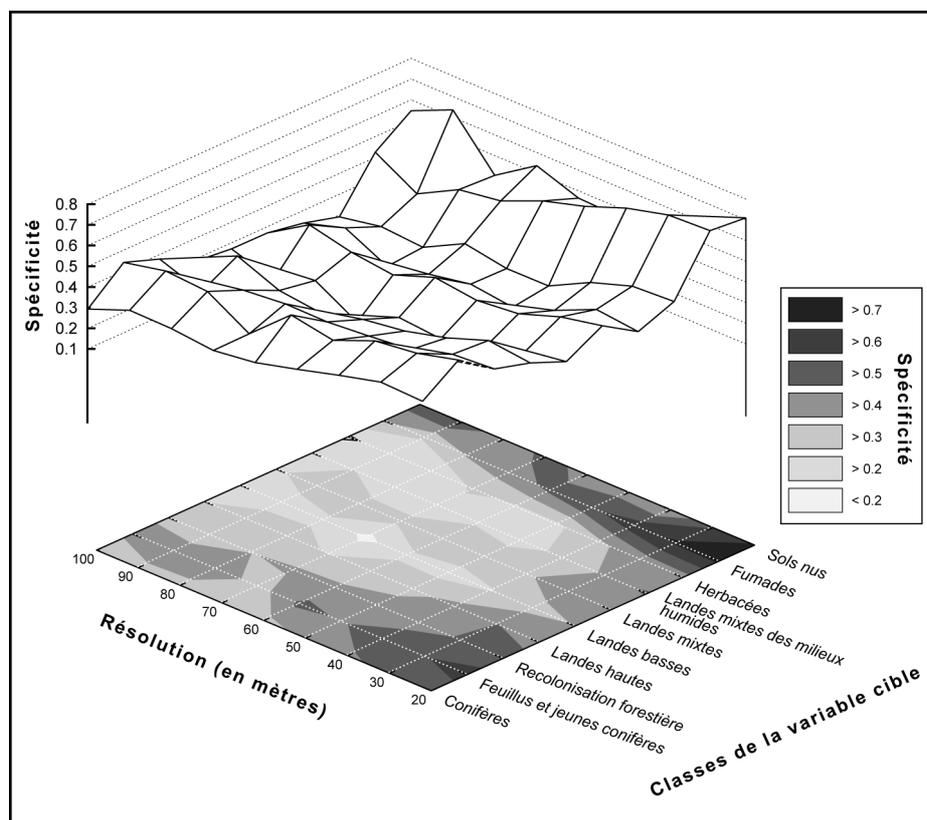


Figure 65 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I)

Ainsi, bien que l'ordre dans lequel les classes de la variable cible sont présentées soit arbitraire, on peut envisager qu'il exprime un gradient de biomasse décroissante (forêt-sol nu). Ce sont les termes extrêmes qui montrent la plus grande spécificité. Cela voudrait donc dire que des conditions extrêmes permettent une meilleure détection des relations écologiques qui contrôlent la distribution spatiale du couvert végétal.

On peut donc s'interroger sur la nature de ce gradient et sur le facteur sous-jacent qui rend compte de cette forme en U. Il est évident que les extrémités représentent des conditions extrêmes et contraignantes et c'est à la faveur de ces contraintes fortes que l'algorithme reconnaît clairement ces niches paysagiques. Au centre du gradient les

rapports entre les types de couverture et les conditions environnementales semblent plus ubiquistes, d'où résulterait une moindre spécificité. Cette interprétation nécessite une analyse plus fine.

Dans notre cas :

- Premier pôle de notre gradient : les groupes forestiers sont fortement inféodés à l'altitude, du fait de l'étagement de la végétation. Leur présence dans les Hautes Chaumes dépendra donc de 2 éléments :
  - une topographie favorable,
  - l'action anthropique, les plantations étant cependant elles-mêmes souvent dépendantes d'une topographie favorable;
- Deuxième pôle :
  - les « fumades » dépendent de la localisation de la jasserie à laquelle elles sont liées, et donc de la topographie, de la présence d'une source en amont, de la présence d'un drain...
  - les « sols nus » sont liés aux zones favorables à de fortes érosions. Ils correspondent également à certaines parcelles labourées ou fauchées dont la localisation dépend d'autres facteurs ;
- Centre : Les « landes » correspondent aux milieux les plus représentés et donc certainement les moins assujettis à des conditions strictes.

Cependant, nous avons vu que les classes « fumades » et « sols nus » avaient fait l'objet de nombreuses confusions lors de la mise en place de la carte de végétation. Les tests de succès nous apportent certaines informations à ce sujet.

#### 6.2.1.5 Évolution des résultats aux tests de succès

Les scores des tests primaires (figure 66) sont faibles et fortement soumis à la résolution. Les scores des tests secondaires globaux (figure 66) sont plus élevés, permettant de valider la part de gain dû aux regroupements *a priori*. Afin de mieux analyser ce gain, l'étude des résultats des tests secondaires de chacune des classes d'occupation du sol est utile (figure 67).

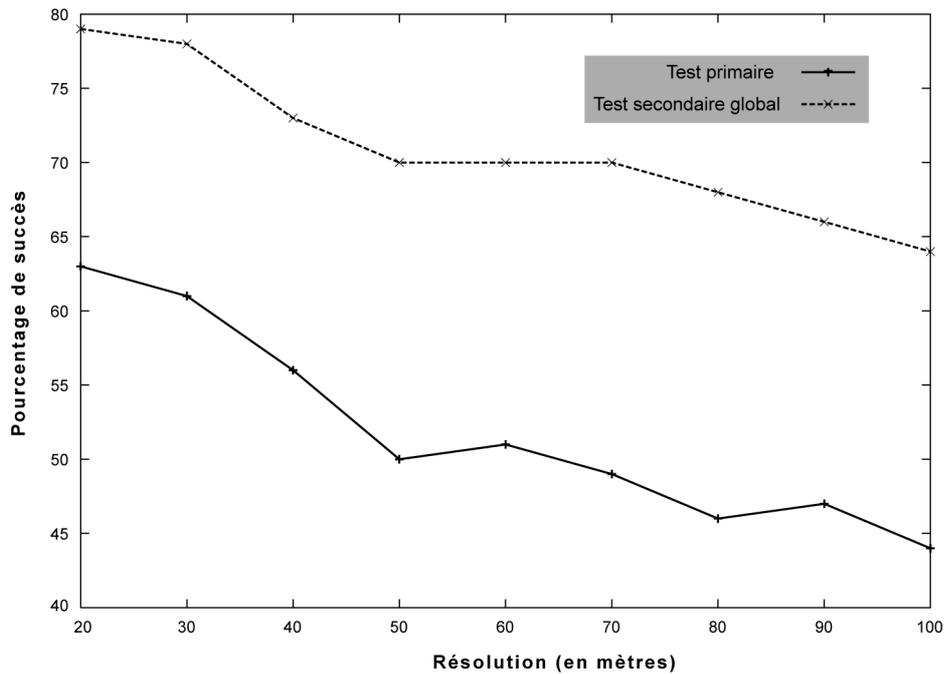


Figure 66 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I)

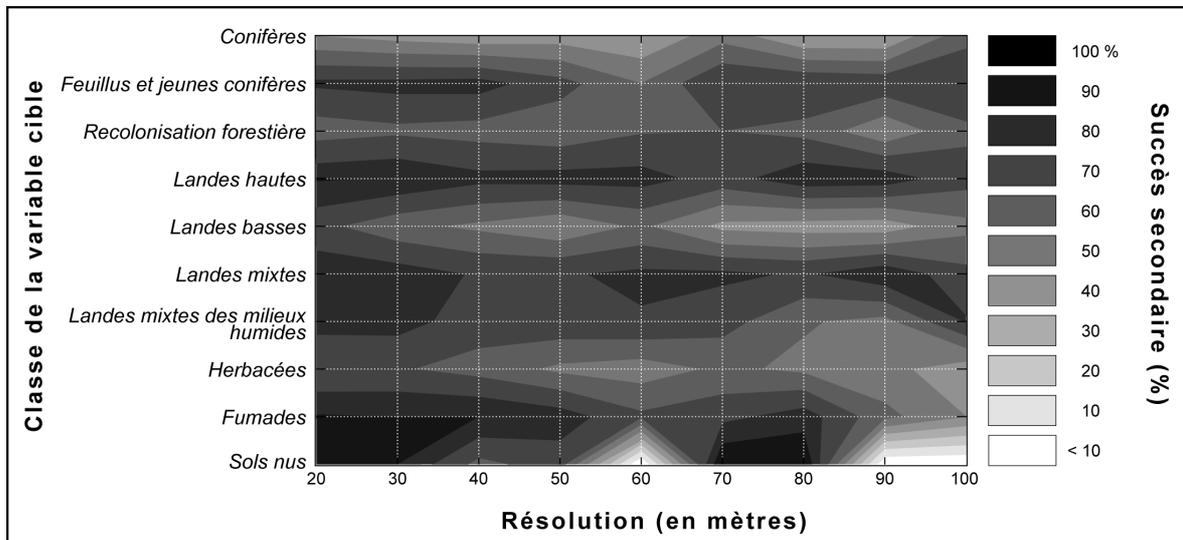


Figure 67 : Évolution des résultats des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I)

Ces derniers sont plus ou moins dépendants de la résolution en fonction de la classe considérée. Ils sont globalement faibles pour les « conifères » et la « recolonisation forestière » (plutôt mixte), atténuant ainsi la légitimité de leur regroupement. Par contre, « feuillus et jeunes conifères » (plutôt des feuillus d'ailleurs) bénéficient largement de leur regroupement avec les deux classes précédentes. Les résultats sont probants pour les

« fumades » et les « sols nus » regroupés avec les « herbacées » (qui bénéficient de façon moindre de ce regroupement). Enfin, les types de landes bénéficient largement de leur regroupement, à l'exception peut-être des « landes basses ». Rappelons que ces regroupements ont été mis en place en fonction de nos observations (cf. chapitre 4.3.1). Ainsi, si les regroupements permettent d'augmenter dans une certaine mesure le succès de prédiction, l'analyse des matrices de succès nous permettent une réelle validation de ces regroupements.

#### 6.2.1.6 Évolution des matrices de succès

Les probabilités de prédictions justes de chaque classe d'occupation du sol diminuent globalement avec la résolution et les confusions persistent. Cependant, la structure des matrices garde une certaine constance (figure 68). Ces matrices nous apportent deux niveaux d'information. Nous avons mis en place une « Matrice de succès après regroupement » à partir de la matrice de résolution 20 m (figure 68). Dans cette matrice, les prédictions justes reportées correspondent à la somme des prédictions justes dans le cadre des regroupements *a priori*.

Nous en tirons plusieurs informations :

- 1/ Le regroupement *a priori* « conifères / Feuillus et jeunes conifères » n'est pas source d'amélioration notable des prédictions. Les « conifères » sont en effet confondus le plus souvent avec les « landes hautes », les « feuillus et jeunes conifères » et la « recolonisation forestière » avec les « landes basses » ;
- 2/ L'association des quatre types de landes leur est plutôt profitable ;
- 3/ La « recolonisation forestière » est largement confondue avec les « landes ». Cette constatation permet de placer le premier type comme un état transitoire entre le second et le type « forestier ». D'autre part, la « recolonisation forestière » est également confondue avec les « herbacées » ;
- 4/ Ces « herbacées » se confondent elles-même de manière importante avec les « fumades » et les « sols nus » d'une part, mais également avec les landes.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	31	15		35						
V2		59	11		14					
V3			48		21					
V4				54		11	12			
V5			14	12	40			11		
V6						59		16		
V7				19		15	38	15		
V8						16		55		
V9								22	66	
V10								57		38

Résolution 20 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	10	10				20	10	40	10	
V2	10	31	21	14	10		10			
V3			39		22				14	
V4				39	11	14	11	14		
V5			13	11	25	11			21	
V6				13		47	12	13		
V7			10	16		15	25	20		
V8						18	16	38		
V9	10		10		25			25	20	
V10								100		0

Résolution 80 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	31	15		32						
V2		53	13		12					
V3		12	47		18					
V4				59		10				
V5		11	11	13	32	12		11		
V6						58		15		
V7				15		16	39	13		
V8						17		53		
V9								17	66	
V10				10		10		50		30

Résolution 30 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	10		30	20	10	10		20		
V2		42	13		19			10		
V3		17	13		35			13		
V4				45	16	14		14		
V5		17	10	12	15			27		
V6						59		18		
V7				19		14	32	27		
V8				11	15	22		30		
V9		11			11	16	26	21	16	
V10								100		0

Résolution 90 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	26			41			14			
V2		44	20		17					
V3		13	45	10	16					
V4				48		10	10	13		
V5		11	12	11	24	15		13		
V6				12	10	44	11	17		
V7				16		27	33	11		
V8						13		52		
V9								17	58	
V10						33		67		0

Résolution 40 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	11	44				11	11	22		
V2		17	11	17	33					
V3			26		11		11	11	26	
V4				30	12	21	12	16		
V5		17	20		14	20		14		
V6				10		42		27		
V7					12	27	12	23		
V8				15	10	27		23	10	
V9			15		10			25	45	
V10								100		0

Résolution 100 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	17	21		24	10	10				
V2		39	14		13					
V3		16	31		20			15		
V4				39		12	12	13		
V5			11	14	26	14		20		
V6				10		47	14	15		
V7				17		13	27	20		
V8				11	11	16		41		
V9								19	50	
V10					25			75		0

Résolution 50 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	46			35						
V2		70			14					
V3			48		21					
V4				77						
V5			14		52			11		
V6						59		16		
V7							72	15		
V8						16		55		
V9									88	
V10										100

Matrice de succès après regroupement

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	18		14	27			14			
V2		40	13	17	13					
V3			30		23			11		
V4				40		14	12	15		
V5		11	16		27	10		19		
V6						52		22		
V7				13		19	29	15		
V8				11		19		41		
V9								36	31	
V10							100			0

Résolution 60 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	25	13		25	13		13			
V2		33	11	11	18		16			
V3		17	34	11	15					
V4				41			12	17		
V5			13		27	15		16		
V6				12		45	12	16		
V7				15		18	34	10		
V8						16		45		
V9								41	27	
V10					50			50		0

Résolution 70 m

Figure 68 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I) (valeur indiquées en %)

Rappel :

- V1 : Conifères
- V2 : Feuillus et jeunes conifères
- V3 : Recolonisation forestière
- V4 : Landes hautes
- V5 : Landes basses
- V6 : Landes mixtes
- V7 : Landes mixtes des milieux humides
- V8 : Herbacées
- V9 : Fumades
- V10 : Sols nus

Il est certain que « landes » et « recolonisation forestière » doivent avoir des caractères proches, leur distinction étant essentiellement due à l'activité humaine, ce qui n'est pas le cas, par exemple, de la forêt et des tourbières. Autrement dit, nous pouvons émettre l'hypothèse que « landes » et « recolonisation forestière » sont assujetties aux mêmes contraintes mais que nous ne possédons pas la ou les variables expliquant la recolonisation.

D'autre part, il est clair que les pratiques pastorales jouent un rôle important sur les taxons de « landes », de « pelouses » et de « sols nus », expliquant certainement une partie des confusions ou tout du moins l'intérêt de leur regroupement.

### 6.2.1.7 Résultats de l'analyse des correspondances

Plusieurs informations importantes nous sont fournies par l'étude des ces graphiques (figure 69). Ils possèdent une forme en croissant parabolique (effet Guttman) couramment rencontrée en analyse des correspondances.

Tout d'abord, on note une constance dans la distribution des points-colonnes (classes d'occupations du sol). Cette dernière se dégrade notablement à partir de la résolution 60 m, résolution pour laquelle, rappelons le, le nombre de cellules n'est pas suffisant pour assurer le bon fonctionnement de Pegase.

	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
1	18%	19%	21%	21%	22%	22%	28%	27%	26%
2	17%	17%	19%	19%	19%	20%	18%	19%	23%
3	14%	15%	16%	15%	15%	14%	15%	13%	12%
4	12%	12%	11%	12%	12%	13%	10%	12%	11%
5	11%	11%	11%	10%	10%	9%	10%	9%	9%
6	8%	9%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	7%
7	8%	8%	7%	7%	7%	5%	6%	6%	6%
8	7%	6%	6%	6%	5%	4%	5%	4%	4%
9	6%	4%	1%	3%	1%	4%	1%	3%	2%
10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 11 : inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (*zone 3 de niveau I*)

Malheureusement, les graphiques obtenus ne semblent pas pouvoir nous donner d'autres indications. Nous avons en effet évalué l'inertie de chacun des 10 axes. La somme de celles des deux premiers axes ne représentant que 35% de l'inertie totale (tableau 11). Toute interprétation serait vaine dans ces conditions. On peut cependant s'interroger sur la position de la classe V9 (« fumades ») dont la position excentrée semble indiquer qu'elle perturbe le système. Le fait que ces fumades correspondent à un usage, autant qu'à une couverture végétale pourrait constituer une explication.

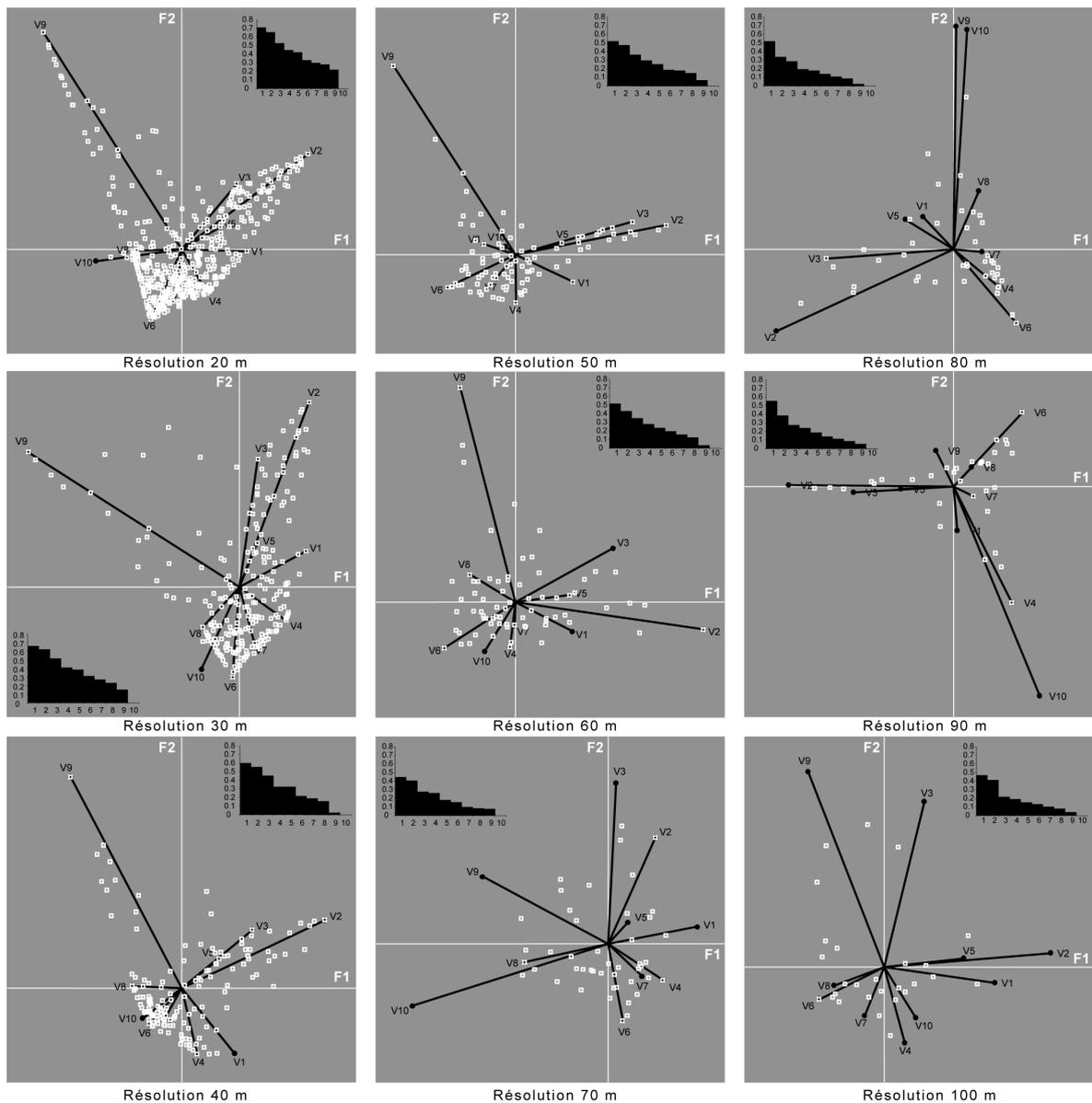
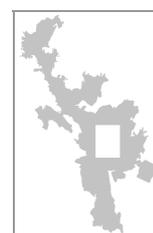


Figure 69 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau I)

Rappelons que cette analyse des correspondances n'est reportée ici qu'à titre indicatif. Pourtant, il paraîtrait envisageable de faire quelques tests en occultant des variables telles que V9 (« fumades ») ou V10 (« sols nus ») qui sont manifestement sources de confusions.

Les analyses des résultats des zones suivantes (respectivement d'étendue II, III et IV) seront organisées d'une façon similaire à celle que nous venons de réaliser. Ces analyses seront plus succinctes et nous n'y reporterons que les informations complémentaires apportées par les résultats.



## 6.2.2 Zone 3 de niveau II

### 6.2.2.1 Évolution de la redondance

La zone 3 (de niveau II) possède une plus grande étendue. Le nombre d'individus devient insuffisant au-delà de 80 m (figure 70). Notons qu'à cette résolution, la redondance ajustée prend une valeur de 100%.

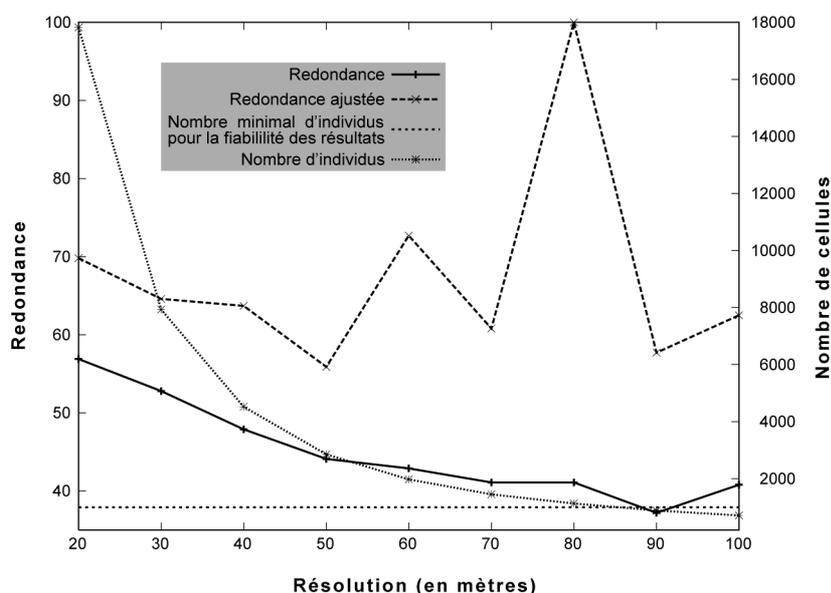


Figure 70 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II)

Ceci est un comportement caractéristique d'une analyse réalisée avec un trop faible nombre de cellules. En fait, il semble bien que le comportement de la redondance ajustée

devient erratique dès 50 m, c'est à dire au-dessous d'un effectif de 2000 individus. Nous ne considérerons que les résolutions de 20 à 70 m.

La redondance à 20 m est de 56,9% : l'ensemble des contraintes exercées par les variables explicatives sélectionnées représente 56,9 % de l'entropie initiale. L'occupation du sol est donc relativement bien déterminée par les descripteurs sélectionnés, ce résultat constituant un score satisfaisant. Cependant, 43,1% de la néguentropie ne sont expliqués par aucune des variables sélectionnées. Ainsi, il est probable que nous ne possédons pas celles qui permettraient d'améliorer ce score. La redondance diminue avec la résolution pour atteindre 41,1% à 70 m ce qui constitue un score relativement faible.

### 6.2.2.2 Évolution de la complexité

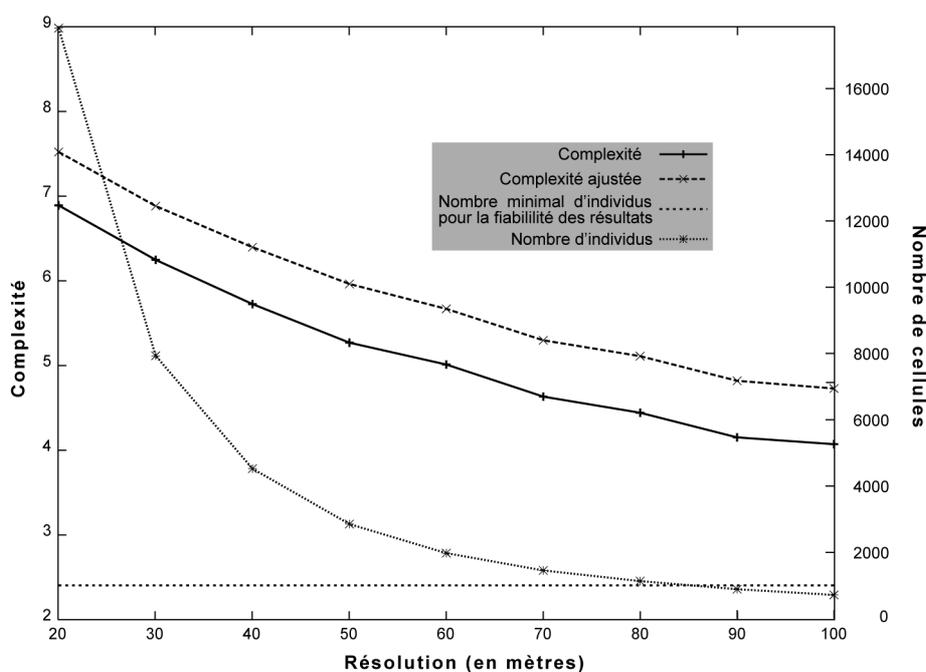


Figure 71 : Évolution de la complexité  $C$  en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II)

Cette diminution est de nouveau à mettre en parallèle avec celle de l'entropie environnementale correspondant à la complexité  $C$  du modèle (figure 71).

### 6.2.2.3 Évolution de la contribution

De nouveau, on note qu'un certain nombre de variables ont contribué de manière relativement importante à la néguentropie (figure 72). Nous les avons encore regroupées en



- La rugosité du relief et le relief local relatif interviennent eux aussi pour de larges noyaux de pixels, mais de façon variable selon la résolution considérée.

On note que pour ces trois variables, il s'agit des valeurs estimées pour des larges fenêtres de pixels. Il semble que pour de plus faibles tailles de fenêtres, les indices n'expriment pas les grandes caractéristiques du relief (par exemple les grandes unités de versants) mais seulement des variations locales.

- La distance aux zones humides joue un rôle important à plusieurs résolutions traduisant la disponibilité de l'eau ;
- L'influence anthropique semble forte et s'exprime au travers de la « fréquentation animale », des « pratiques agricoles », l'« utilisation et l'« exploitation des surfaces ».

#### 6.2.2.4 Évolution de la spécificité

On retrouve la forme en U déjà observée avec la zone de niveau I (figure 73).

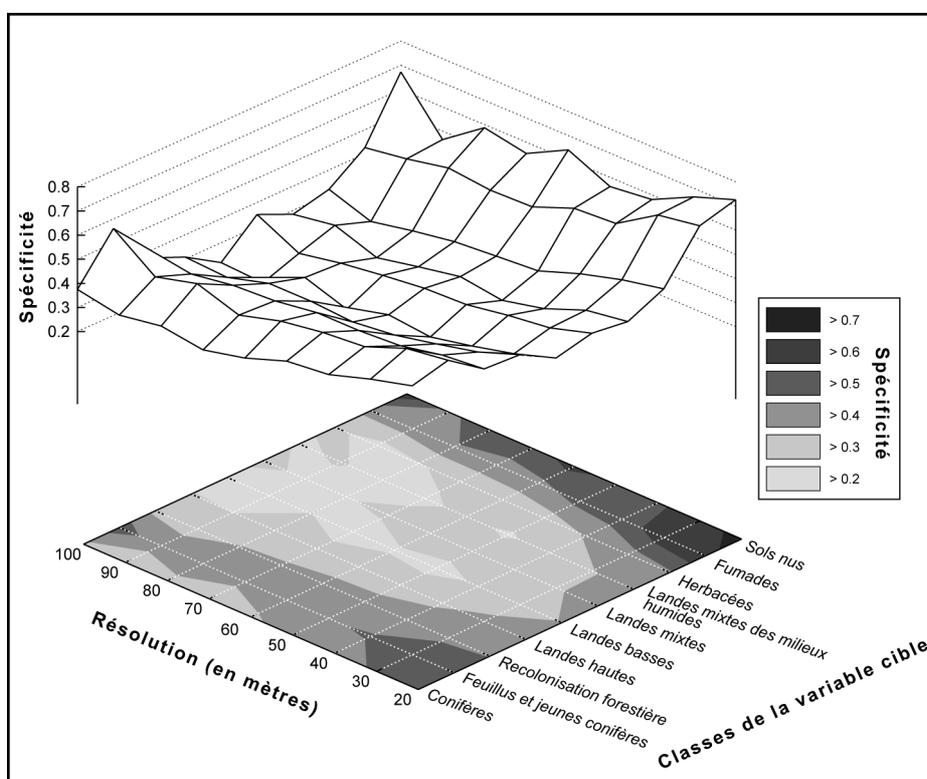


Figure 73 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II)

On note également que le gradient est ici beaucoup plus marqué, la spécificité des classes « extrêmes » (types forestiers et fumades, sols nus) restant élevée quelle que soit la résolution.

#### 6.2.2.5 Évolution des résultats aux tests de succès

Les scores des tests de primaires (figure 74) sont faibles et soumis à la résolution. Les scores des tests secondaires globaux sont meilleurs permettant de valider le gain dû aux regroupements *a priori*.

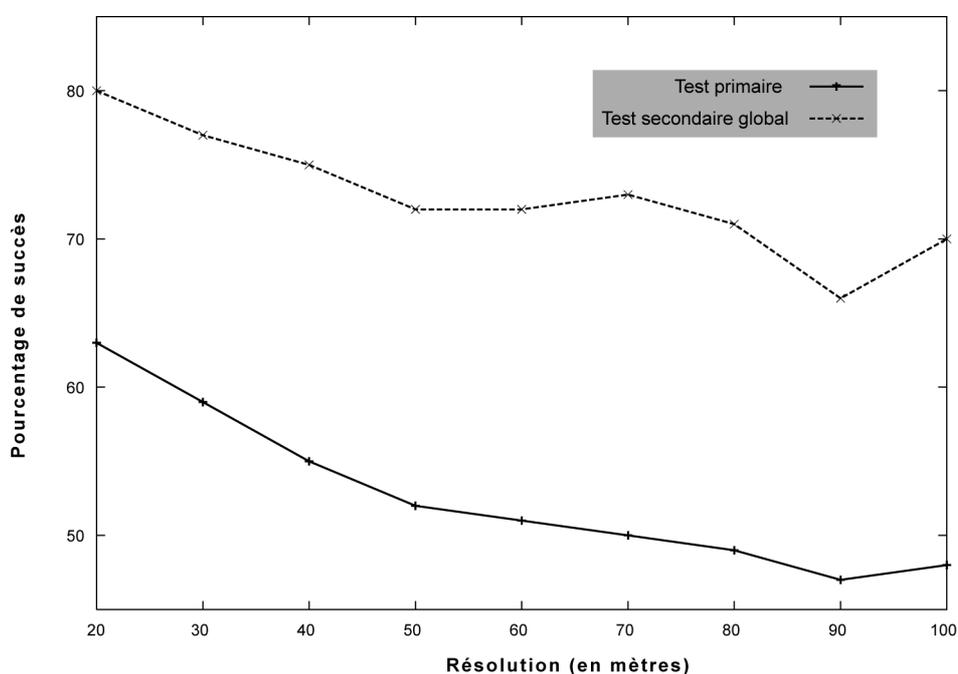


Figure 74 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II)

Les scores des tests secondaires de chacune des classes d'occupation du sol (figure 75) sont plus ou moins dépendants de la résolution en fonction de la classe considérée. Ils sont globalement faibles pour les « conifères » et la « recolonisation forestière » atténuant ainsi la légitimité de leur regroupement. En revanche, ils bénéficient largement aux « fumades » et « sols nus ».

Globalement, ces résultats sont donc relativement similaires à ceux obtenus pour la zone précédente.

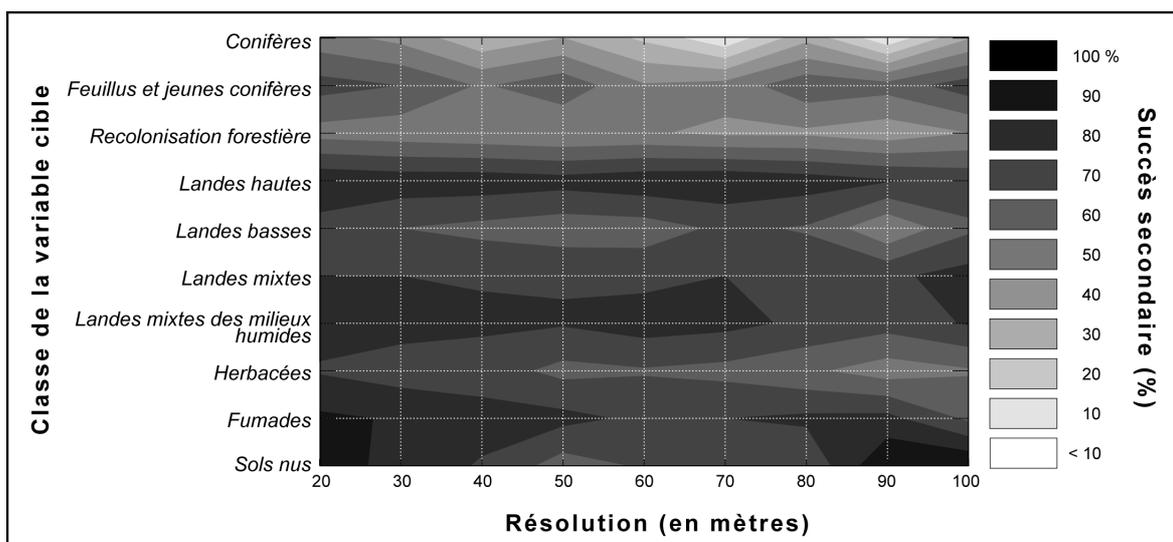


Figure 75 : Évolution du résultat des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II)

#### 6.2.2.6 Évolution des matrices de succès

Cette similitude est confirmée par l'étude des matrices de succès (figure 76).

Comme pour la zone de niveau I, les probabilités de prédiction juste de chaque classe d'occupation du sol diminuent globalement avec l'augmentation de la résolution et les confusions persistent. Cependant, la structure des matrices reste relativement constante.

Ces matrices nous apportent plusieurs informations :

1/ Le regroupement *a priori* « conifères / feuillus et jeunes conifères » n'est pas source d'amélioration notable des prédictions. Ceci pourrait signifier que ces deux types de couverts ont une écologie distincte alors qu'on tendrait plutôt à les considérer comme des termes transitoires d'une succession temporelle. Une raison plausible serait une opposition « feuillus » – « conifères ».

Les « conifères » sont confondus le plus souvent avec les « landes hautes », la « recolonisation forestière (mixte) » avec les « landes basses » et les « feuillus et jeunes conifères » avec les deux ;

2/ L'association des quatre types de landes leur est plutôt profitable.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	39			31						
V2		47	12	14	13					
V3			38		20			10		
V4				55			11			
V5			11	12	38	12		10		
V6						54	10	19		
V7				17		16	42	12		
V8						14		62		
V9								26	60	
V10								40		41

Résolution 20 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	27					10	20	20		
V2		22	18	10	20			10		
V3		19	31		11			16		
V4				44		10	13	18		
V5				13	24	21	10	16		
V6				13		45	10	20		
V7				17	12	14	25	17		
V8				11		16		45		
V9								38	30	
V10	14					14	14		14	43

Résolution 80 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	28	10		32			11			
V2		50	10	12	10					
V3		11	39		17			10		
V4				48		12	13			
V5				14	31	15		16		
V6				11		49		17		
V7				17		16	39	10		
V8						14		59		
V9								23	58	
V10						13		30	13	32

Résolution 30 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	8			24	16	20	12			
V2		21	21	16			11			
V3			31			21		15		
V4				35		21		16		
V5				15	16	17		27		
V6				10		43	10	24		
V7				16		21	29	18		
V8				13		21		39		
V9				10				29	37	
V10					25		25	25	25	25

Résolution 90 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	34			31						
V2		35	10	17	12					
V3			33		15			14		
V4				43		12	10			
V5				13	26	17		14		
V6				11		49	10	19		
V7				18		18	31	13		
V8						14		57		
V9								34	42	
V10						14		38	14	28

Résolution 40 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	22			26	13	13	13			
V2		41	14		17					
V3			28		11	11	14	17	11	
V4				35		16	18	16		
V5					25	21	15	11		
V6				10		52		17		
V7				22	10	18	25	13		
V8				11		13		52		
V9			10					32	34	
V10								67		33

Résolution 100 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	32			16	10		15	10		
V2		36		12	21					
V3		12	30	10	15					
V4				41		14	11	10		
V5				19	23	12		16		
V6				11		42	11	20		
V7				15		17	33	13		
V8						18		51		
V9								32	43	
V10				10				30	10	30

Résolution 50 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	39			31						
V2		59		14	13					
V3			38		20			10		
V4				66						
V5			11		62			10		
V6						64		19		
V7							75	12		
V8						14		62		
V9									86	
V10										81

Matrice de succès après regroupement

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	22	12		20	10		15	10		
V2		24	13		14		14	16		
V3		12	32		12	11	6	18		
V4				42	10	14	11	13		
V5				13	23	16	12	17		
V6				11		48		17		
V7				19		10	27	20		
V8						12		53		
V9								28	36	
V10								27	36	36

Résolution 60 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	22	12		20	10		15	10		
V2		24	13		14		14	16		
V3		12	32		12	11	6	18		
V4				42	10	14	11	13		
V5				13	23	16	12	17		
V6				11		48		17		
V7				19		10	27	20		
V8						12		53		
V9								28	36	
V10								27	36	36

Résolution 70 m

Figure 76 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II) (valeurs indiquées en %)

Rappel :

- V1 : Conifères
- V2 : Feuillus et jeunes conifères
- V3 : Recolonisation forestière
- V4 : Landes hautes
- V5 : Landes basses
- V6 : Landes mixtes
- V7 : Landes mixtes des milieux humides
- V8 : Herbacées
- V9 : Fumades
- V10 : Sols nus

3/ Les « herbacées » se confondent elles-mêmes de manière importantes avec les « fumades » et les « sols nus » d'une part, mais également avec les « landes ». Il existe une logique sous-jacente à cette dernière constatation. En effet, comme nous l'avons déjà indiqué, les « herbacées », donc les « fumades », peuvent apparaître en sol nu lorsqu'elles sont fauchées, voire labourées.

### 6.2.2.7 Résultats de l'analyse des correspondances

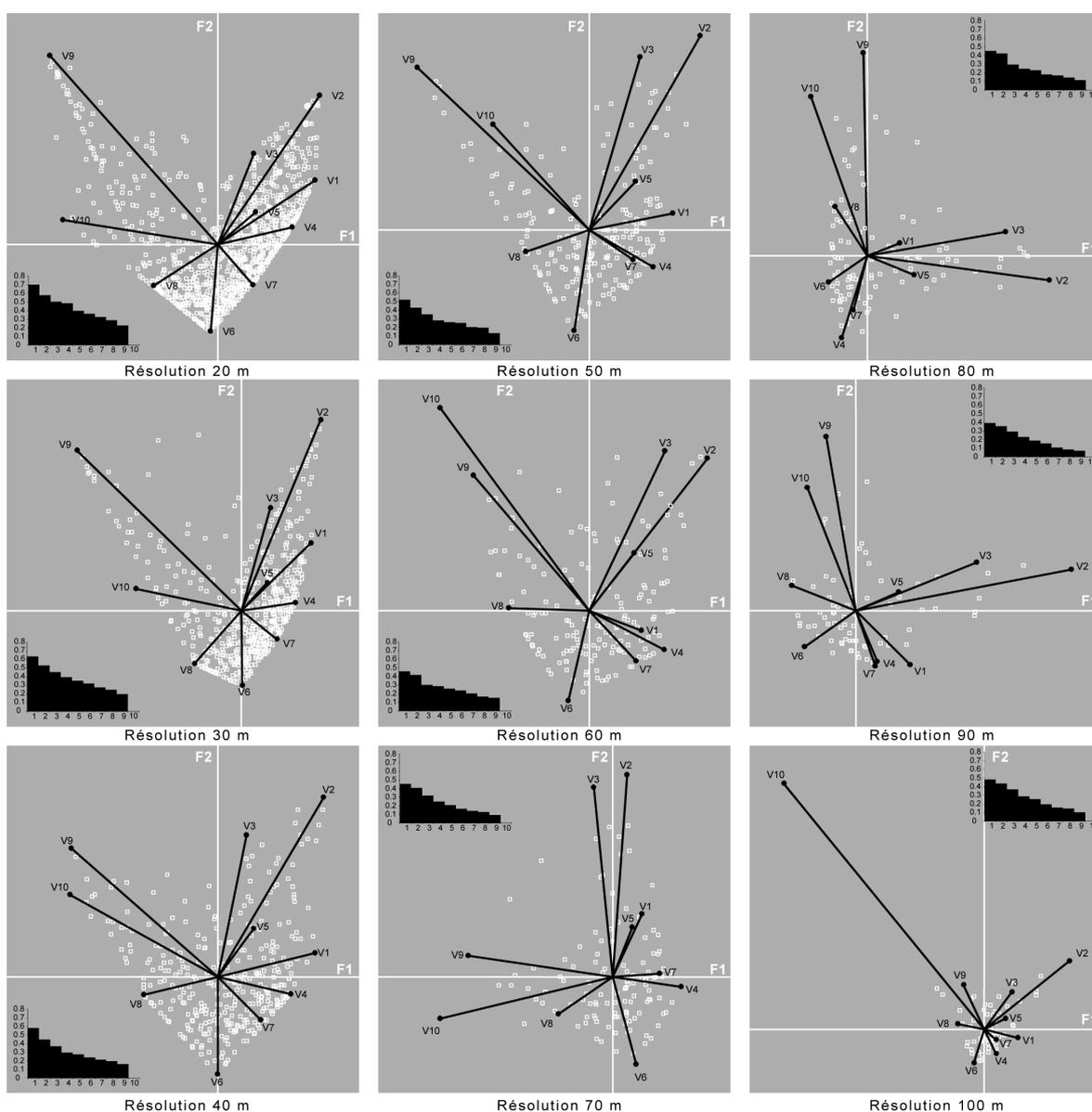


Figure 77 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau II)

Les graphiques montrent de nouveau des formes caractéristiques en croissants paraboliques relativement constantes au fil de l'augmentation de la résolution, et ce jusqu'à la résolution à 60 m. Les graphiques s'organisent sensiblement de la même façon que pour la zone précédente. Mais au vu des inerties respectives de chaque axe (tableau 13), aucune interprétation légitime ne peut-être réalisée.

	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
<b>1</b>	18%	19%	21%	20%	19%	21%	20%	21%	20%
<b>2</b>	15%	15%	16%	16%	17%	19%	19%	19%	18%
<b>3</b>	13%	13%	13%	13%	12%	15%	13%	16%	15%
<b>4</b>	13%	12%	11%	11%	12%	12%	11%	12%	12%
<b>5</b>	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
<b>6</b>	9%	9%	9%	10%	10%	8%	8%	8%	8%
<b>7</b>	8%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	6%	6%
<b>8</b>	7%	7%	7%	7%	7%	6%	6%	5%	6%
<b>9</b>	6%	6%	6%	5%	6%	4%	5%	4%	4%
<b>10</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

*Tableau 13 : inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau II)*

### 6.2.3 Zone 3 de niveau III

#### 6.2.3.1 Évolution de la redondance



Toutes les résolutions peuvent être considérées, puisque le nombre d'individus est toujours supérieur au seuil indicatif de 1000 m, limite en dessous de laquelle nous le considérons comme insuffisant pour garantir la fiabilité des résultats. Cependant notons qu'à partir de 70m, la redondance ajustée varie de façon très irrégulière. La redondance à 20 m est de 59,7% (figure 78) : l'ensemble des contraintes exercées par les variables explicatives sélectionnées de représente que 59,7 % de l'entropie initiale. L'occupation du sol est donc relativement bien déterminée par les descripteurs sélectionnés. Comme pour la zone précédente, l'organisation du paysage n'est pas entièrement soulevé : 40,3% de la néguentropie n'est pas expliquée par les variables sélectionnées. Ainsi, il est probable que

nous ne possédons pas celles qui permettraient score. Elle diminue avec la baisse de la résolution pour atteindre 39% à 100 m ce qui constitue un score faible.

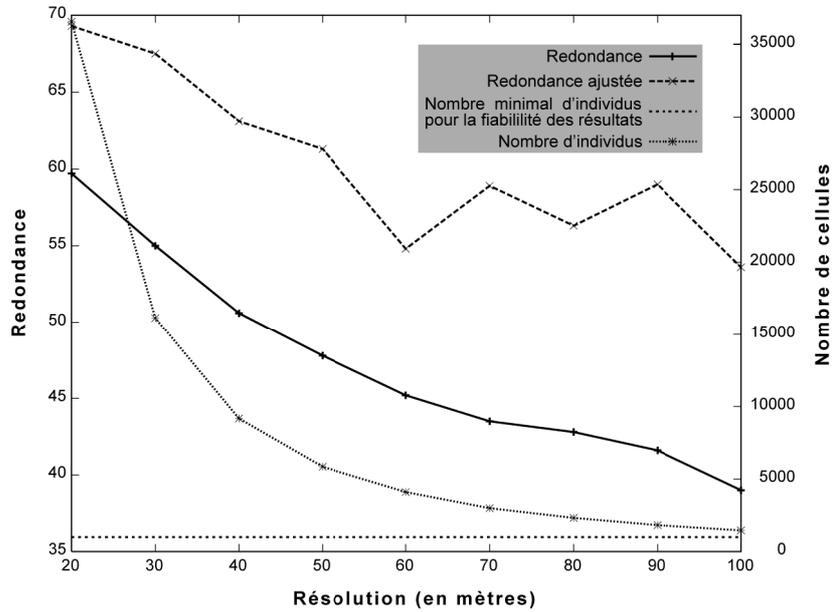


Figure 78 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III)

### 6.2.3.2 Évolution de la complexité

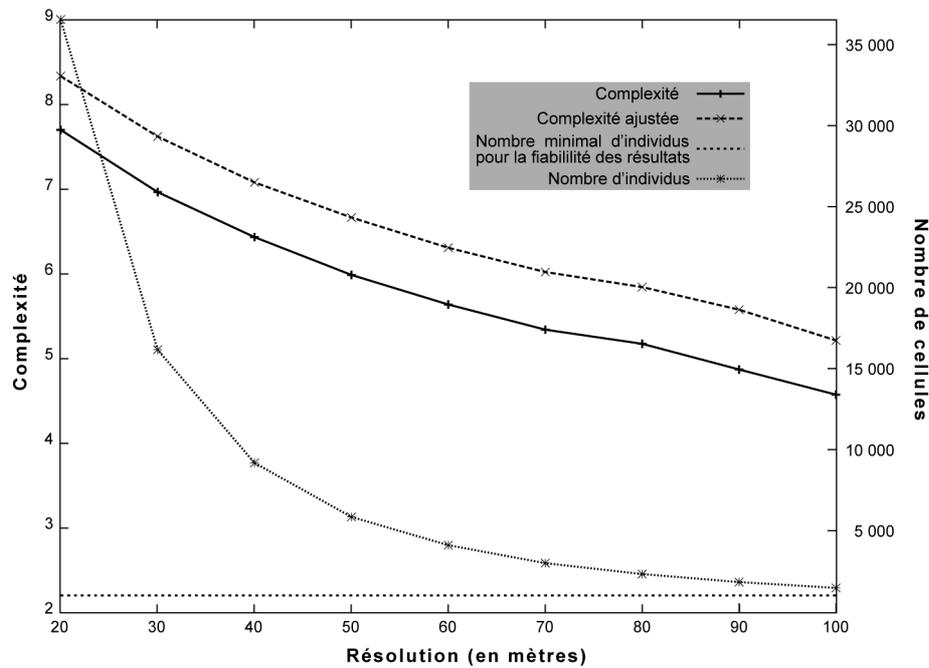


Figure 79 : Évolution de la complexité C en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III)

Cette diminution est encore à mettre en parallèle avec celle de l'entropie environnementale correspondant à la complexité C du modèle.

### 6.2.3.3 Évolution de la contribution

Un certain nombre de variables ont contribué de manière relativement importante à la néguentropie (figure 80). Nous les avons de nouveau séparées en deux groupes : celles qui contribuent quelle que soit la résolution (grisées dans le tableau 14) et celles qui ne contribuent qu'à des résolutions données.

On note donc :

- L'altitude qui contribue à la réduction de l'entropie aux plus hautes résolutions ;
- L'exposition, plus particulièrement avec de larges noyaux de pixels ;
- La rugosité du relief et le relief local relatif interviennent surtout pour de larges fenêtres de pixels ;
- La durée d'insolation théorique ;
- Les type de formations superficielles.

Il est d'ailleurs intéressant de noter que ces deux dernières variables n'apparaissent pas dans les résultats des zones précédentes.

- La distance aux zones humides n'intervient qu'à la résolution 20m ;
- Et enfin, les variables anthropiques : l'utilisation et l'exploitation des surfaces interviennent à toutes les résolutions. Dans une moindre mesure, la fréquentation animale n'entrent en jeu qu'à seulement deux résolutions.

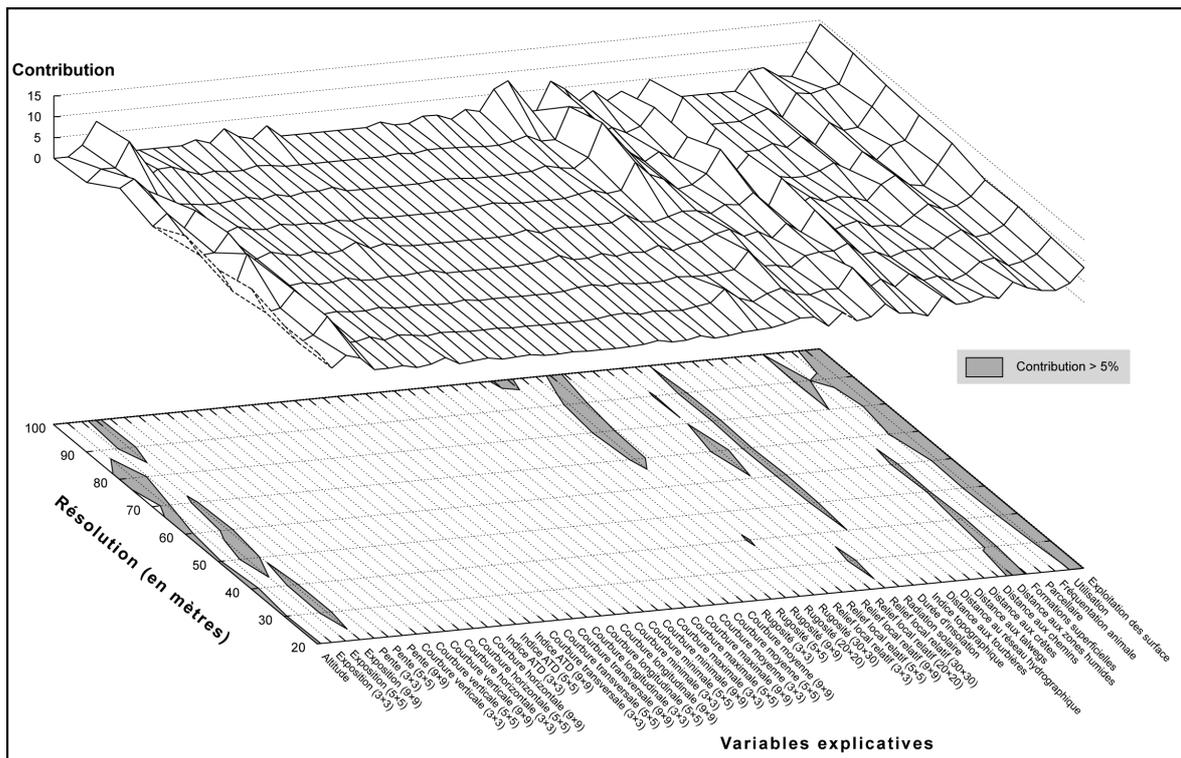


Figure 80 : Évolution de la contribution de chaque variable en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III)

	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
altitude	■								
exposition (3×3)						■		■	
exposition (5×5)				■					
exposition (9×9)		■			■	■		■	■
rugosité du relief (3×3)									■
rugosité du relief (5×5)									■
rugosité du relief (20×20)									■
rugosité du relief (30×30)									■
relief local relatif (30×30)		■				■			
durée d'insolation théorique				■	■	■	■	■	
distance aux zones humides	■								
type de formations superficielles		■	■	■	■	■	■	■	
fréquentation animale						■			
utilisation	■	■	■	■	■	■	■	■	■
exploitation des surfaces	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des variables dont la contribution est significative (zone 3 de niveau III)

### 6.2.3.4 Évolution de la spécificité

La spécificité de chacune des classes de la variable cible (figure 81) est elle aussi influencée par la diminution de la résolution, les spécificités étant plus importantes à haute résolution. Cette influence est cependant différente selon la classe considérée. On retrouve de nouveau la forme en « fer à cheval », déjà observée précédemment, les spécificités des deux types forestiers, des « fumades » et du « sol nu » étant plus importantes et caractérisant un gradient.

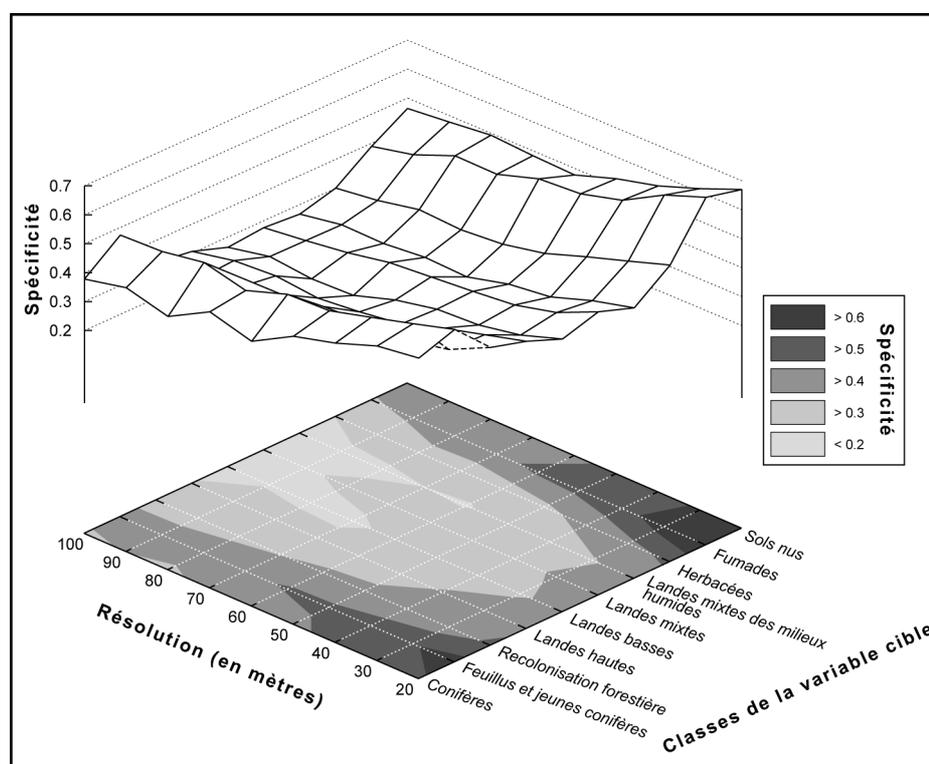


Figure 81 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III)

### 6.2.3.5 Évolution des résultats aux tests de succès

Les scores des tests primaires (figure 82) sont globalement faibles. On note une diminution en fonction de la résolution. Les scores des tests secondaires globaux sont meilleurs permettant, comme dans les zones précédemment étudiées, de valider le gain dû aux regroupements *a priori*.

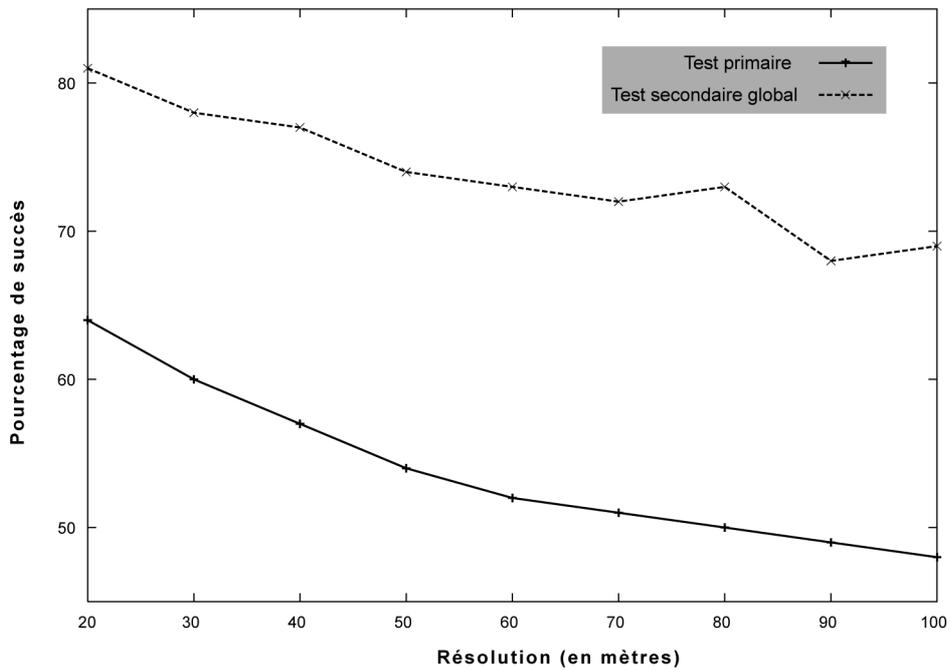


Figure 82 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III)

Enfin, les scores des tests secondaires de chacune des classes d'occupation du sol (figure 83) sont dépendants de la résolution mais gardent cependant une certaine homogénéité donnant un aspect plutôt « zébré » au graphique. Ils sont globalement faibles pour la « recolonisation forestière » et les « landes basses ». Par contre, on remarque un bénéfice au profit des « fumades » et « sols nus ».

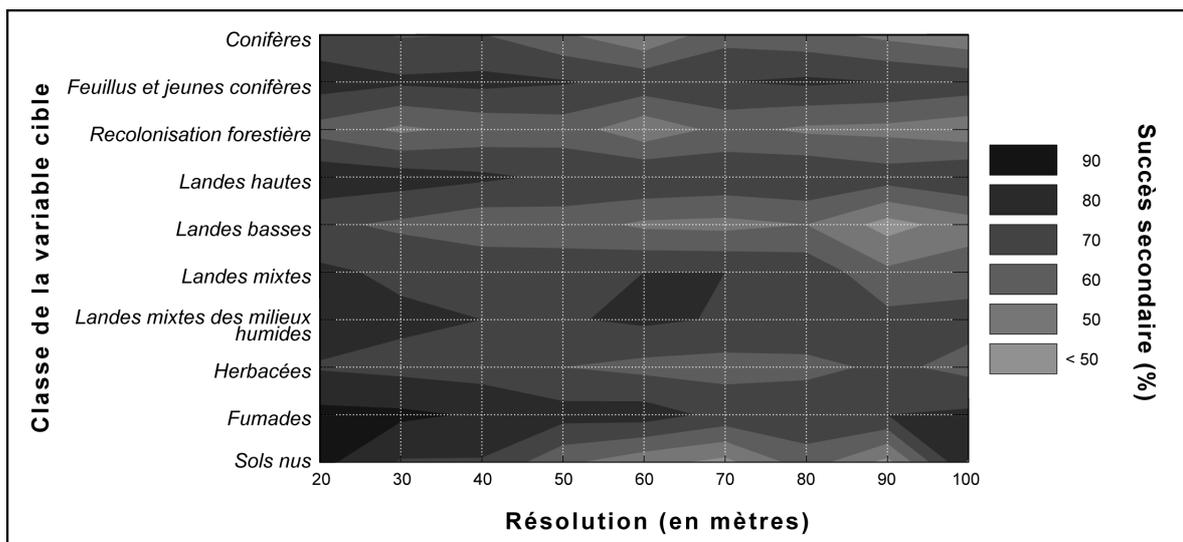


Figure 83 : Évolution du résultat des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III)

Ceci est confirmé par l'étude des matrices de succès.

#### 6.2.3.6 Évolution des matrices de succès

Globalement, comme pour les zones précédentes, les probabilités de prédictions justes de chaque classe d'occupation du sol diminuent avec la baisse de la résolution et les confusions persistent. Cependant, la structure des matrices reste relativement constante (figure 84).

Ces matrices nous apportent plusieurs informations :

1/ Le regroupement *a priori* « conifères / Feuillus et jeunes conifères » n'est pas source d'amélioration notable des prédictions. Les « conifères » sont en effet confondus le plus souvent avec les « landes hautes », la « recolonisation forestière » avec les « landes basses » et les « feuillus et jeunes conifères » avec les deux ;

2/ L'association des quatre types de landes leur est plutôt profitable ;

3/ Les « herbacées » se confondent elles-même de manière importante avec les « fumades » et les « sols nus » d'une part, mais également avec les « landes ».

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	50	17		18						
V2		59		10						
V3		15	40		18					
V4				52			14			
V5			12	13	38	10				
V6						55	11	19		
V7				17		17	43	11		
V8						13		64		
V9									62	
V10								39		39

Résolution 20 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	25	22		12				12		
V2	13	43		11	11					
V3		15	29						15	
V4				39		12	18	11		
V5		12		13	22	11	13	14		
V6				10		41	14	21		
V7				17		16	37	11		
V8						17	10	49		
V9				10		13		30	30	
V10	12			12			18	35		6

Résolution 80 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	46	18		16						
V2		57	10	11						
V3		17	35		16					
V4				48		10	14			
V5			10	11	34	12		13		
V6						50	12	20		
V7				17		16	39	14		
V8						15		60		
V9								29	54	
V10						10		39		34

Résolution 30 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	26	20		15				15		
V2		45		12	12					
V3		21	18					18		
V4				43			16	12		
V5		13		13	25	12		18		
V6				14		39	10	21		
V7				17		20	31	12		
V8						16		46		
V9						16		32	25	
V10							13	33	20	20

Résolution 90 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	41	18		18						
V2		52	11	10						
V3		16	30		15			13		
V4				44		11	15			
V5			10	14	29	11		15		
V6				10		44	14	21		
V7				18		19	35	12		
V8						15		56		
V9								34	46	
V10						11		36	13	29

Résolution 40 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	23	17		23				12		
V2		46			14					
V3		14	23		10	10	13	14		
V4				36		10	14	15		
V5		14		12	23	11	11	17		
V6				12		40	11	24		
V7				13		13	29	23		
V8						16		51		
V9						16		27	30	
V10							18	36		9

Résolution 100 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	32	16		21						
V2	11	44	13	11						
V3		19	30	10	14					
V4				42		12	12			
V5				12	31	12		13		
V6				11		44	12	22		
V7				17		16	35	14		
V8						18		53		
V9								31	43	
V10							11	42	15	13

Résolution 50 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	67			18						
V2		59		10						
V3			55		18					
V4				66						
V5			12		61					
V6						66		19		
V7							77	11		
V8						13		64		
V9									89	
V10										78

Matrice de succès après regroupement

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	34	17		20						
V2		47	10	10	10					
V3		19	29	12				12		
V4				40		10	18	11		
V5		12		11	30	10	10	12		
V6				10		42	14	23		
V7				19		17	30	15		
V8						16		51		
V9								30	44	
V10						16	13	38		9

Résolution 60 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	39	18		16						
V2	12	44			11					
V3		19	21	13	12			15		
V4				39		13	14	11		
V5		10		13	21	13		16		
V6				11		44	11	21		
V7				18		14	35	13		
V8						15		51		
V9								35	30	
V10				10		17	10	30	17	13

Résolution 70 m

Figure 84 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III) (valeurs indiquées en %)

Rappel :

- V1 : Conifères
- V2 : Feuillus et jeunes conifères
- V3 : Recolonisation forestière
- V4 : Landes hautes
- V5 : Landes basses
- V6 : Landes mixtes
- V7 : Landes mixtes des milieux humides
- V8 : Herbacées
- V9 : Fumades
- V10 : Sols nus

### 6.2.3.7 Évolution des résultats de l'analyse des correspondances

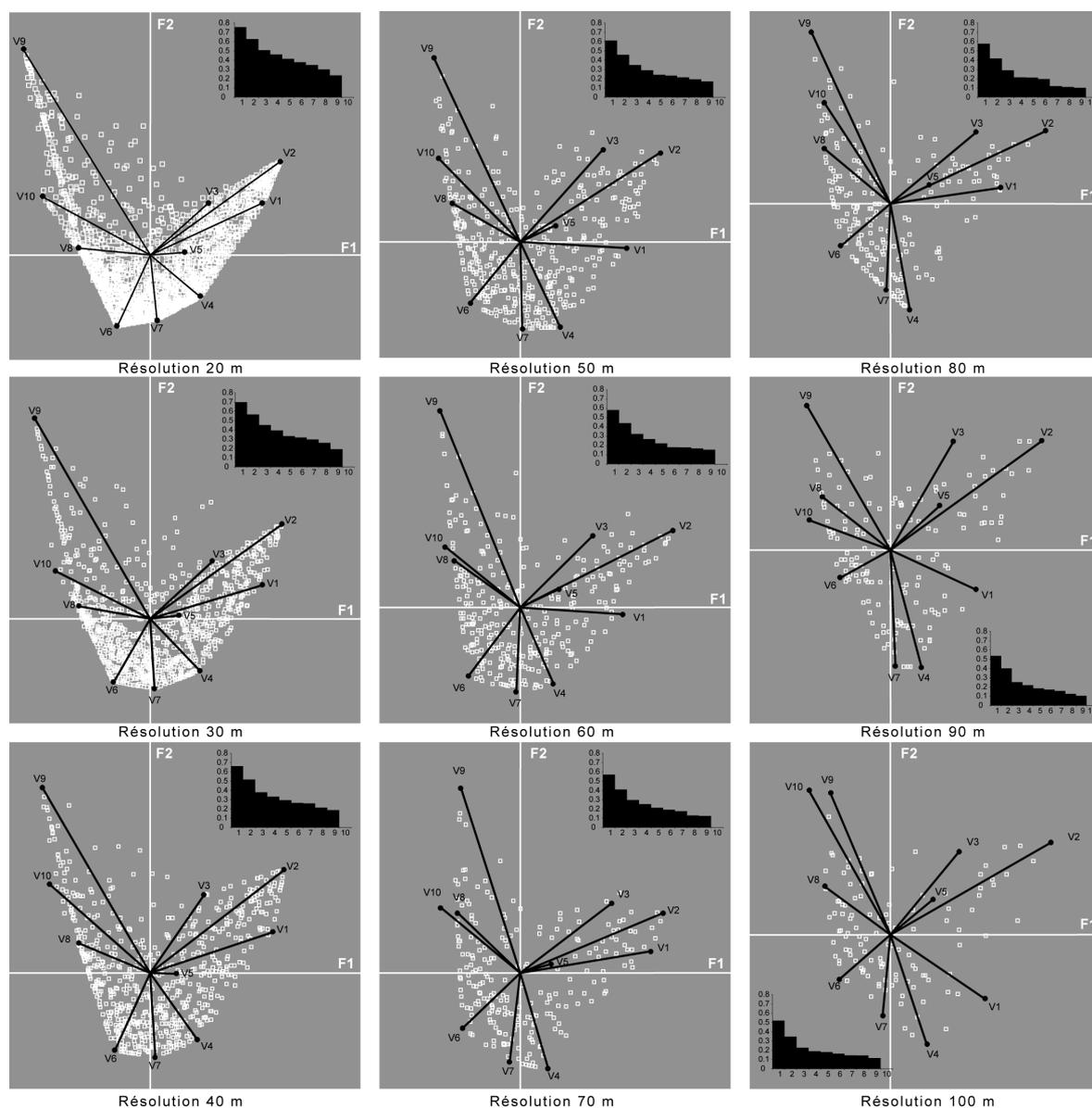


Figure 85 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau III)

L'aspect du graphique est cette fois conservé quelle que soit la résolution considérée. Cependant, il n'est toujours pas possible de faire une interprétation légitime au vu de l'inertie de chaque axe (tableau 15).

	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
<b>1</b>	19%	20%	21%	22%	23%	24%	26%	25%	26%
<b>2</b>	16%	16%	17%	17%	17%	17%	19%	19%	17%
<b>3</b>	13%	13%	12%	13%	13%	13%	13%	12%	11%
<b>4</b>	11%	11%	11%	10%	11%	11%	10%	10%	9%
<b>5</b>	10%	10%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
<b>6</b>	9%	9%	9%	8%	7%	8%	9%	8%	8%
<b>7</b>	9%	8%	8%	8%	7%	7%	5%	7%	7%
<b>8</b>	7%	7%	7%	7%	7%	5%	5%	6%	7%
<b>9</b>	6%	5%	6%	6%	6%	5%	5%	5%	6%
<b>10</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 15 : Inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau III)

## 6.2.4 Zone 3 de niveau IV

### 6.2.4.1 Évolution de la redondance

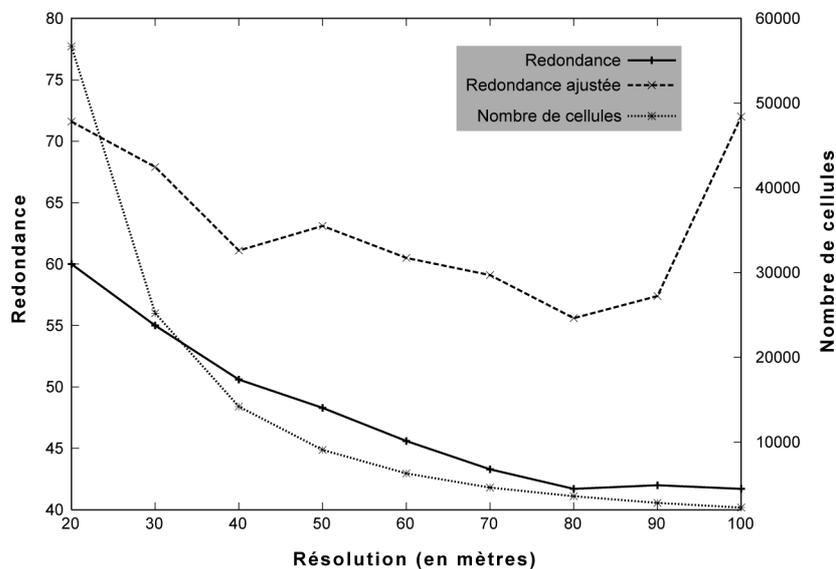
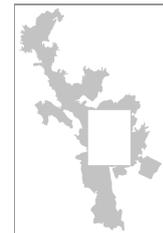


Figure 86 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV)

La redondance à 20 m est de 60 % (figure 86) : l'ensemble des contraintes exercées par les variables explicatives sélectionnées ne représente que 60 % de l'entropie initiale. L'occupation du sol est donc relativement bien déterminée par les descripteurs sélectionnés. Cependant, 40% de la néguentropie ne sont pas expliqués par aucune des variables sélectionnées. Là encore, nous ne possédons certainement celles qui permettraient d'améliorer ce score. La redondance n'est plus que de 41,7% à 100 m.

#### 6.2.4.2 Évolution de la complexité

Cette diminution est à mettre en parallèle avec celle de l'entropie environnementale correspondant à la complexité  $C$  du modèle (figure 87).

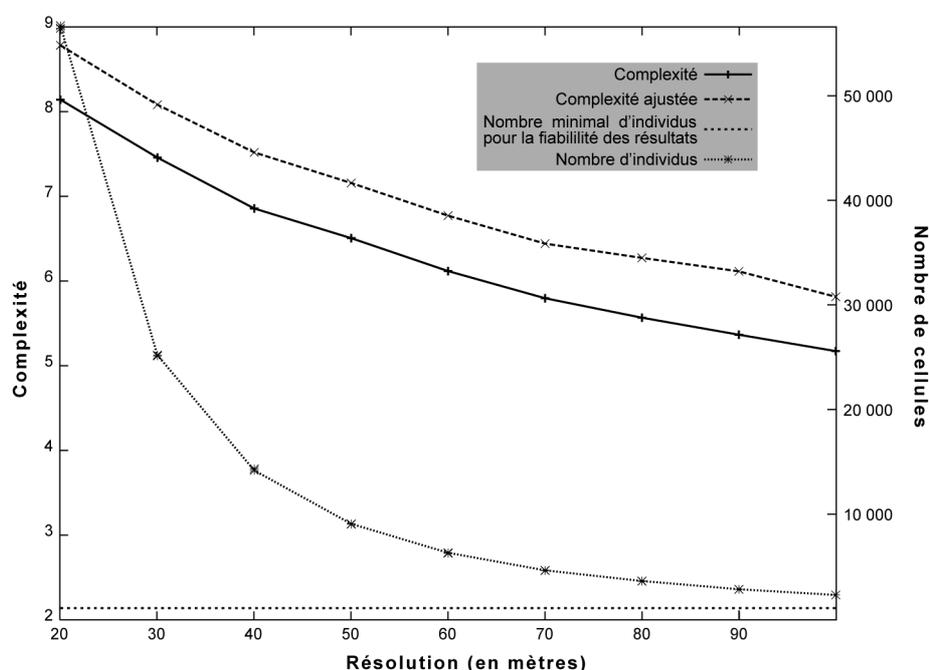


Figure 87 : Évolution de la complexité  $C$  en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV)

#### 6.2.4.3 Évolution de la contribution

Un certain nombre de variables ont contribué de manière relativement importante à la néguentropie (figure 88). Nous les avons de nouveau séparées en deux groupes : celles qui contribuent quelle que soit la résolution (grisées dans le tableau 16) et celles qui ne contribuent qu'à des résolutions données.

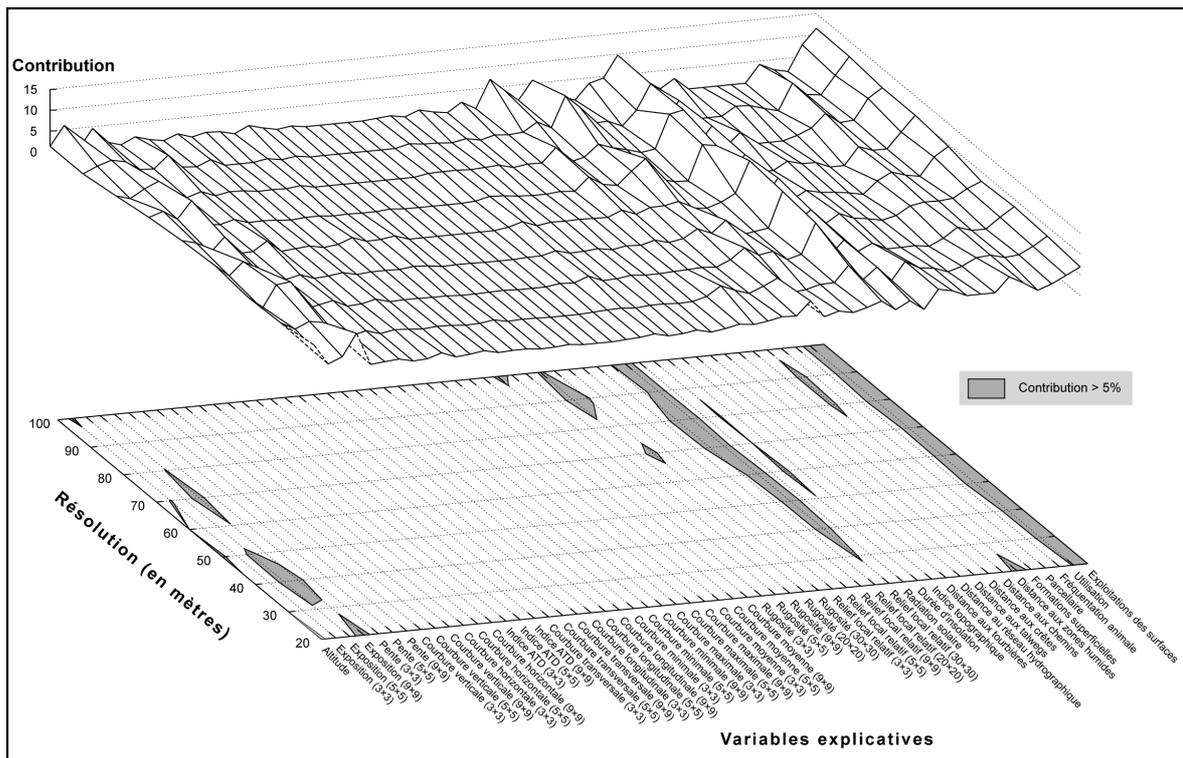


Figure 88 : Évolution de la contribution de chaque variable en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV)

	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
altitude	■			■					
exposition (3×3)						■			■
exposition (5×5)			■	■					
exposition (9×9)	■		■				■		
rugosité du relief (3×3)									■
rugosité du relief (5×5)									■
rugosité du relief (20×20)								■	■
rugosité du relief (30×30)						■	■	■	■
relief local relatif (20×20)						■	■	■	■
relief local relatif (30×30)		■	■	■	■	■	■	■	■
durée d'insolation théorique					■	■	■	■	■
distance aux tourbières						■	■	■	■
distance aux zones humides	■								
type de formations superficielles							■	■	■
utilisation	■	■	■	■	■	■	■	■	■
exploitation des surfaces	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des variables dont la contribution est significative (zone 3 de niveau IV)

À cette étendue, la contribution de l'altitude, de l'exposition ou de la rugosité du sol est significative à seulement quelques résolutions.

L'influence des pratiques agricoles semble également très importante à travers l'utilisation ou l'exploitation des surfaces.

#### 6.2.4.4 Évolution de la spécificité

La spécificité de chacune des classes de la variable cible (figure 89) peut elle aussi être influencée par la diminution de la résolution. Cette influence est cependant différente selon la classe considérée. Les spécificités sont plus importantes à haute résolution.

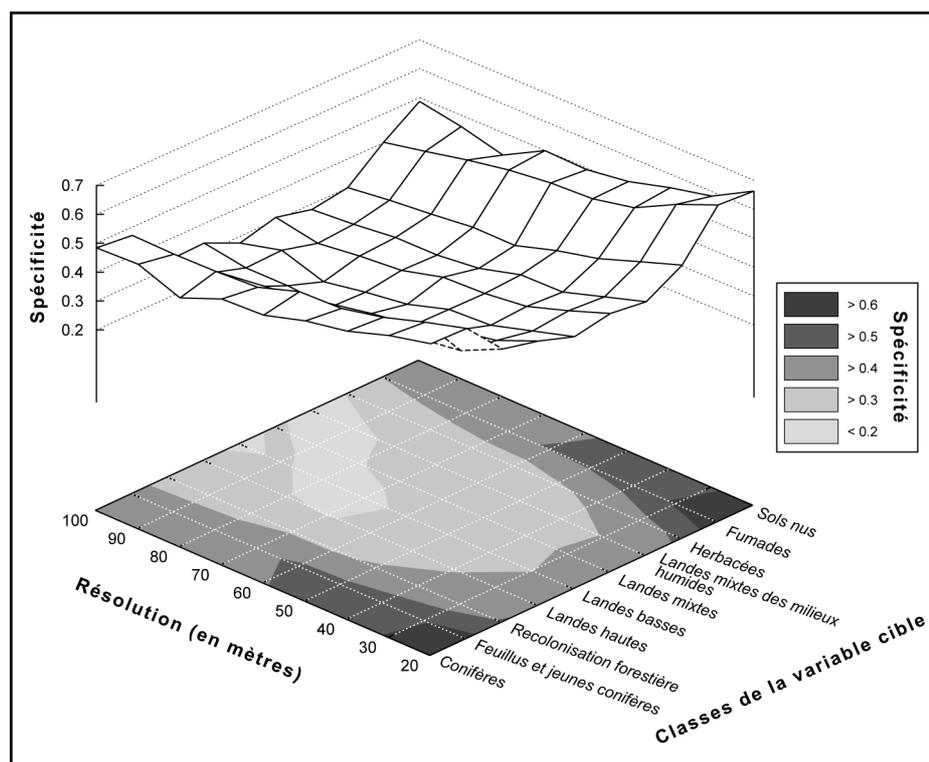


Figure 89 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV)

On retrouve de nouveau la forme en « fer à cheval », déjà observée précédemment, les spécificités des deux types forestiers, des « fumades » et du « sol nu » étant plus importantes.

6.2.4.5 Évolution des résultats aux tests de succès

Les scores des tests primaires (figure 90) sont globalement faibles. On note globalement une diminution en fonction de la résolution. Les scores des tests secondaires globaux sont meilleurs permettant de valider le gain dû aux regroupements a priori.

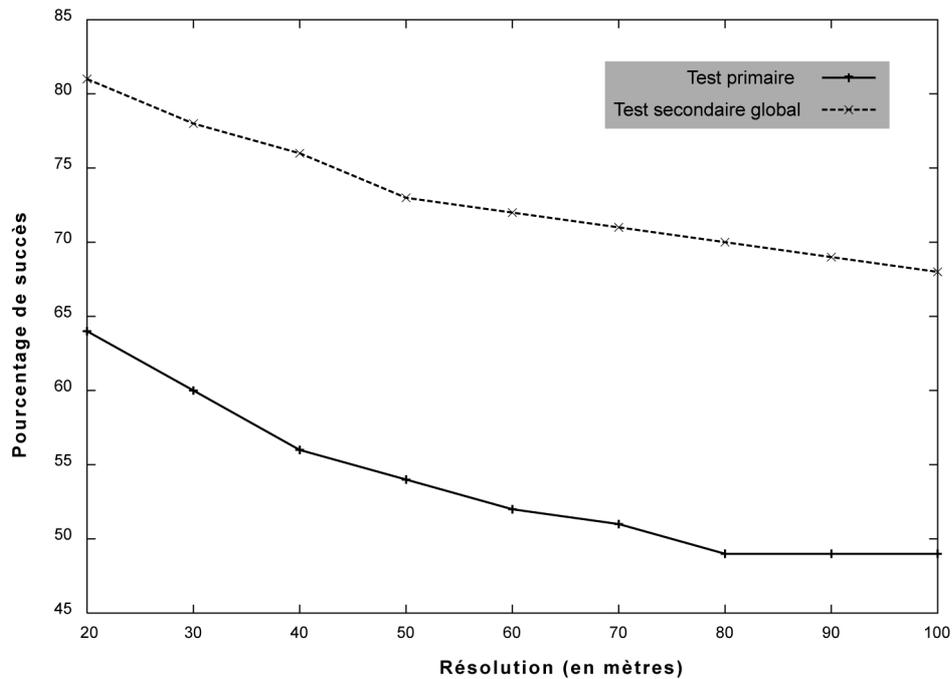


Figure 90 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV)

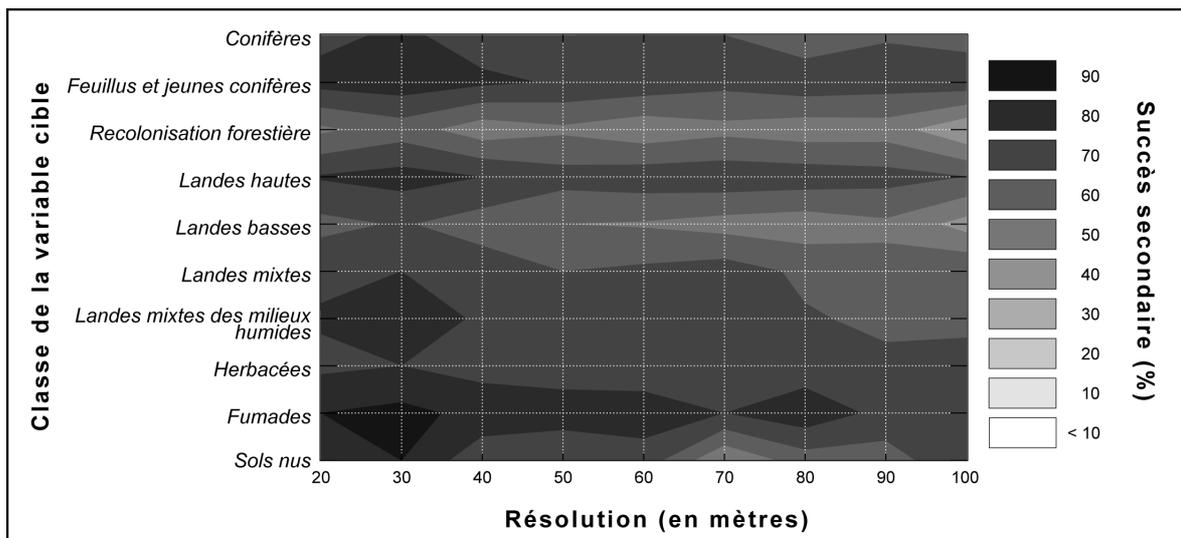


Figure 91 : Évolution du résultat des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV)

Enfin, les scores des tests secondaires de chacune des classes d'occupation du sol (figure 91) sont dépendants de la résolution mais gardent cependant une certaine homogénéité donnant un aspect plutôt « zébré » au graphique.

Ils sont :

- Globalement faibles pour la « recolonisation forestière » et les « landes basses » atténuant ainsi la légitimité des regroupements effectués *a priori* ;
- Élevés pour les autres landes, les « fumades » et les « sols nus », notamment aux fortes résolutions.

#### 6.2.4.6 Évolution de l'aspect des matrices de succès

Ceci est confirmé par l'étude des matrices de succès (figure 92).

Comme pour les zones précédentes, les probabilités de prédictions justes de chaque classe d'occupation du sol diminuent globalement avec la résolution et les confusions persistent. Cependant, la structure des matrices reste relativement constante.

Ces matrices nous apportent plusieurs informations :

- 1/ « Landes hautes » et « herbacées » sont les types d'occupation du sol responsables du plus grand nombre de confusions ;
- 2/ L'association des quatre types de « landes » leur est plutôt profitable, mais ils sont régulièrement confondus avec les « herbacées ». Il en va de même pour les « herbacées » et les « sols nus » ;
- 3/ Les trois types forestiers sont souvent confondus avec les landes.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	55	16		17						
V2		60		10						
V3		14	39		17			11		
V4				51			13			
V5			11	13	39	10		10		
V6						51	12	21		
V7				17		15	44	12		
V8						13		65		
V9								30	57	
V10								35		44

Résolution 20 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	30	23		14						
V2		41		15						
V3		18	22	10	17			11		
V4				38		12	12	11		
V5				14	26	11		22		
V6				10		40	10	23		
V7				14		18	31	18		
V8						16		52		
V9						12		32	30	
V10				13		15		29		13

Résolution 80 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	49	17		16						
V2	10	54		11						
V3		15	31		19			12		
V4				47			13			
V5			11		36	11		13		
V6						49	11	21		
V7				16		16	40	14		
V8						13		61		
V9								31	51	
V10								35		33

Résolution 30 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	32	17		16				13		
V2		42		13	11					
V3		16	23	10				18		
V4		10		38		14	11	12		
V5		13		11	25	11	11	18		
V6				14		32	12	26		
V7				18		16	28	21		
V8						14		48		
V9								35	29	
V10				13			13	26		26

Résolution 90 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	47	17		18						
V2	12	49		11						
V3		14	29		16			15		
V4				45		11	13			
V5		10			32	10		15		
V6				10		43	13	22		
V7				17		17	35	15		
V8						14		58		
V9								33	42	
V10						12	34			28

Résolution 40 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	38	16		15						
V2		45	10	12	10					
V3		14	19		14	11		21		
V4				40		12	13	10		
V5		10		12	28	12		15		
V6				14		39	11	23		
V7				15		18	24	26		
V8						13		50		
V9								36	21	
V10						15		49		12

Résolution 100 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	41	17		16						
V2		48	11	10						
V3		14	35		14			12		
V4				41		12	13	10		
V5				14	30	10		15		
V6				11		41	10	21		
V7				16		17	35	16		
V8						13		56		
V9								32	40	
V10						11		38		20

Résolution 50 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	71			17						
V2		60		10						
V3			53		17			11		
V4				64						
V5			11		62			10		
V6						63		21		
V7							76	12		
V8						13		65		
V9									87	
V10										89

Matrice de succès après regroupement

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	43	16		12						
V2	11	49		10						
V3		15	25	11	12			16		
V4				40		13	12	11		
V5				13	27	11		17		
V6				11		42	11	23		
V7				19		18	34	13		
V8						14		52		
V9								34	37	
V10				12		14		27		25

Résolution 60 m

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	37	16		13						
V2	13	41		12	11					
V3		13	31		12			15		
V4				35		14	14	13		
V5		11		13	25	12		17		
V6				12		38	12	23		
V7				18		17	30	19		
V8						15		52		
V9								36	37	
V10						14		31		24

Résolution 70 m

Figure 92 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV) (valeurs indiquées en %)

Rappel :

- V1 : Conifères
- V2 : Feuillus et jeunes conifères
- V3 : Recolonisation forestière
- V4 : Landes hautes
- V5 : Landes basses
- V6 : Landes mixtes
- V7 : Landes mixtes des milieux humides
- V8 : Herbacées
- V9 : Fumades
- V10 : Sols nus

### 6.2.4.7 Évolution des résultats de l'analyse des correspondances

L'aspect du graphique est cette fois conservé quelle que soit la résolution considérée. Cependant, il n'est toujours pas possible de faire une interprétation légitime au vu de l'inertie de chaque axe (tableau 17).

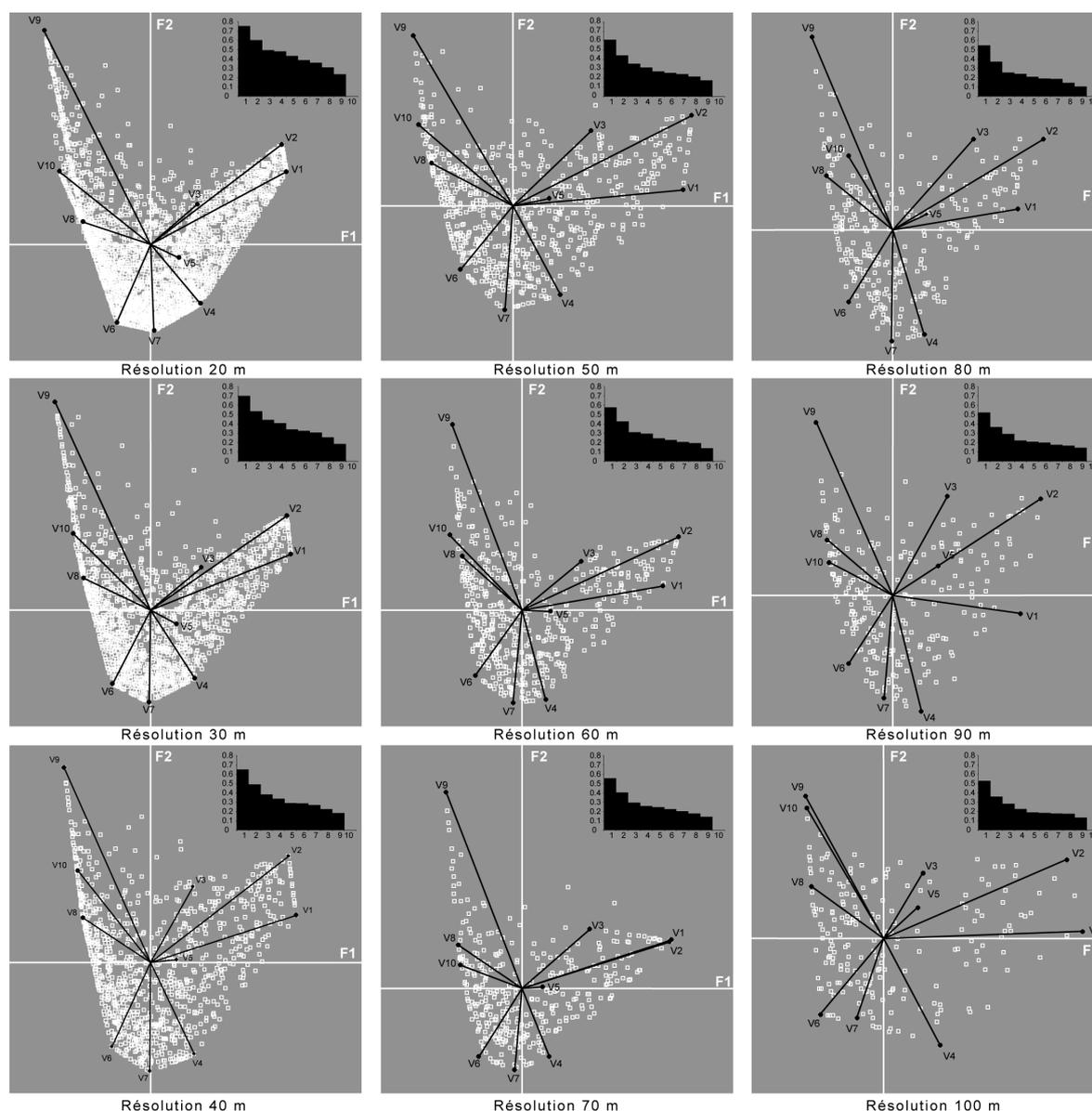


Figure 93 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau IV)

	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m
<b>1</b>	19%	20%	21%	21%	22%	22%	24%	23%	23%
<b>2</b>	15%	15%	16%	15%	16%	16%	17%	16%	16%
<b>3</b>	12%	13%	12%	12%	12%	12%	11%	13%	13%
<b>4</b>	12%	12%	11%	11%	11%	10%	11%	10%	10%
<b>5</b>	11%	10%	9%	9%	9%	10%	9%	9%	8%
<b>6</b>	10%	9%	9%	9%	9%	9%	8%	9%	8%
<b>7</b>	9%	9%	9%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
<b>8</b>	8%	7%	7%	7%	7%	7%	6%	7%	8%
<b>9</b>	6%	5%	6%	6%	5%	6%	5%	6%	6%
<b>10</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

*Tableau 17 : Inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau IV)*

## 6.2.5 Bilan

Les quatre analyses précédentes, portant sur quatre zones d'étendues différentes emboîtées les unes dans les autres, ont donc été menées à différentes résolutions. L'échelle considérée est incontestablement primordiale dans le déroulement du processus divisif, les meilleurs résultats étant obtenus pour les résolutions et les étendues les plus élevées.

À chaque fois, nous avons levé une part importante de l'organisation du paysage caractérisée par la valeur de la redondance. Chaque analyse a permis de sélectionner certaines variables en prenant en considération leur contribution à la néguentropie, donc à la redondance c'est à dire à l'organisation du système.

En cela, il nous est possible de valider la première hypothèse que nous avons formulé à savoir qu'il était possible de mettre en avant un certain nombre de variables structurant le paysage et d'estimer leurs contributions à l'organisation du paysage.

Pour chaque zone, nous avons travaillé à différentes résolutions, observant une certaine variabilité quant à l'implication de ces facteurs. Mais ayant pris les zones indépendamment les unes des autres, nous n'avons fait jouer qu'une seule composante de la notion d'échelle, ce qui ne nous permet de ne valider que partiellement l'hypothèse 2.

Pour cela, nous avons mis en place une analyse comparée des quatre zones en fonction de l'évolution de l'étendue.

## 6.3 Effet de l'étendue

Nous avons envisagé le problème sous deux approches présentant une certaine complémentarité :

- Une première où nous considérons une zone donnée (en l'occurrence la zone 3) et comparons les résultats obtenus à chaque niveau en fonction de la résolution ;
- Une seconde où nous sélectionnons une résolution donnée et observons l'évolution de certains résultats (redondance et complexité) en fonction du niveau d'étendue pour chacune des zones 3, 4 et 5.

### 6.3.1 ... en fonction de la résolution pour une zone donnée

#### 6.3.1.1 Redondance et variation de l'étendue

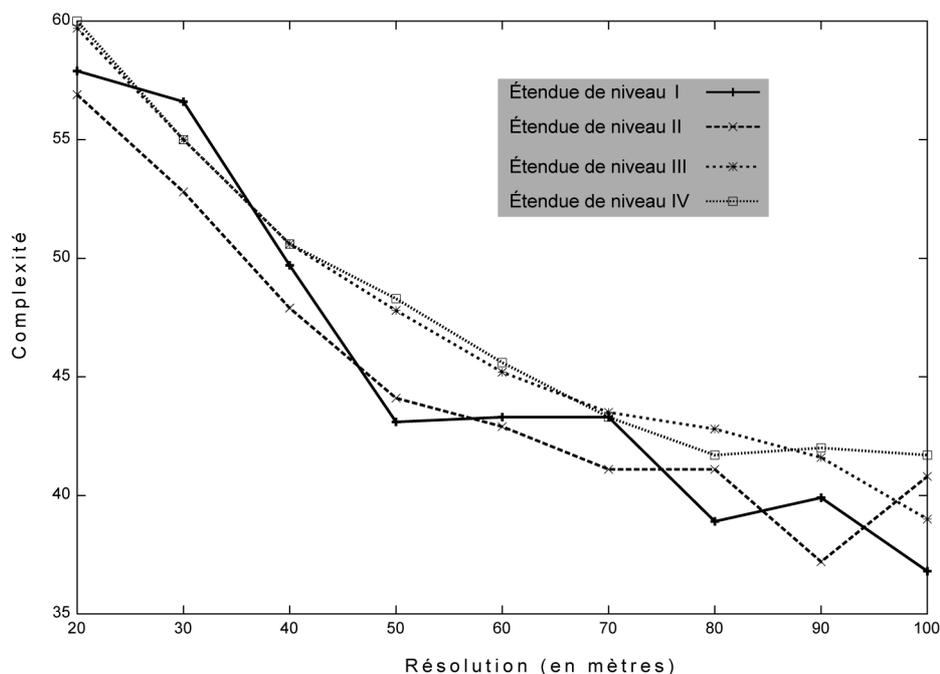


Figure 94 : Évolution de la redondance en fonction de la résolution aux différentes étendues considérées (zone 3)

Globalement, c'est avec les étendues les plus élevées (III et IV) que nous obtenons la meilleure redondance et ce, à chaque résolution (figure 94). L'aspect des courbes est d'ailleurs sensiblement le même pour ces deux niveaux d'étendue.

D'autre part, à la résolution 70m, la redondance obtenue pour le niveau I est identique à celle obtenue pour les niveaux III et IV, mais nous rappellerons qu'à cette résolution et pour ce niveau d'étendue, le nombre de cellules a été estimé comme étant insuffisant pour valider les résultats du processus. Cela est logique : en effet, à l'instar de l'augmentation de la résolution, celle de l'étendue permet d'accroître le nombre d'individus. Le modèle cerne donc d'autant mieux le système ce qui induit une redondance plus importante.

### 6.3.1.2 Complexité et variation de l'étendue

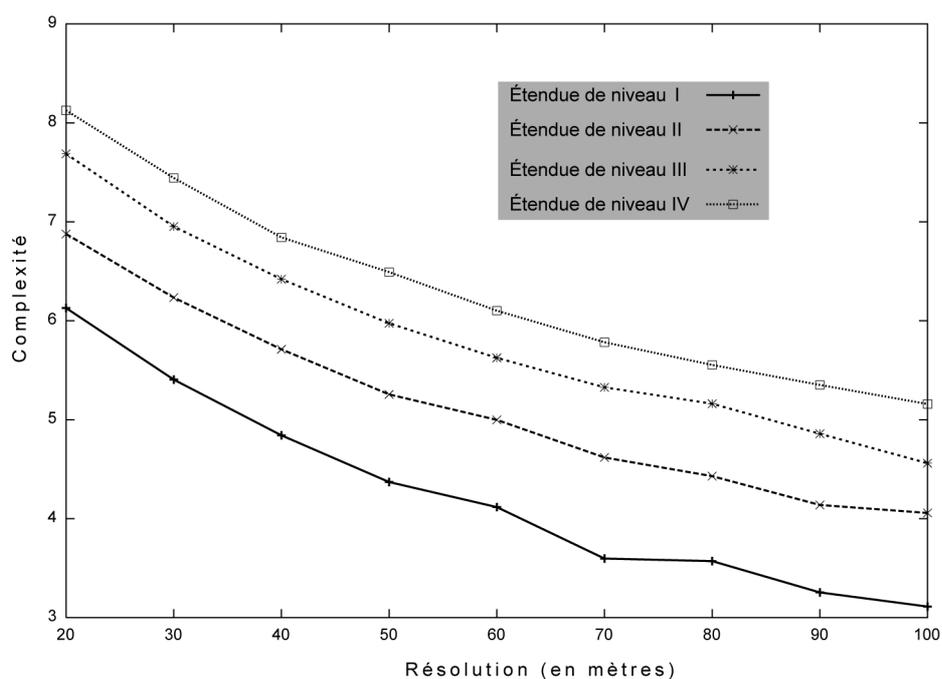


Figure 95 : Évolution de la complexité en fonction de la résolution aux différentes étendues considérées

La complexité du système décroît avec la résolution mais augmente avec le niveau d'étendue (figure 95). Ceci est aisément expliqué, comme pour la négentropie, par un nombre de cellules augmentant avec l'étendue (et la résolution).

### 6.3.1.3 Contribution et variation de l'étendue

L'étude de la contribution à la néguentropie des différentes variables en fonction de la résolution et de l'étendue (figure 96) permet de classer ces variables en deux groupes :

- Les variables dont la contribution est prédominante, c'est-à-dire qui interviennent à de multiples résolutions à une ou plusieurs étendues données. C'est le cas de l'altitude, de l'exposition 9×9, de la rugosité 30×30, du relief local relatif 30×30, de la distance aux zones humides et des pratiques agricoles (fréquentation animale, utilisation et type de pratiques agricoles). Ces variables ont des niveaux d'étendue de prédilection (tableau 18). Nous considérerons qu'un niveau d'étendue est le niveau de prédilection d'une variable si cette dernière intervient de façon significative dans plus de la moitié des résolutions retenues.

<i>Variables contribuable</i>	<i>Niveau de prédilection</i>			
	I	II	III	IV
Altitude				
Exposition 9×9				
Rugosité 30×30				
Relief local relatif 30×30				
Distance aux zones humides				
Formations superficielles				
Fréquentation animale				
Utilisation				
Exploitation des surfaces				

*Tableau 18 : Niveau de prédilection des variables « dominantes » en fonction de l'étendue*

On note que ces mêmes variables dominantes n'ont pas forcément la même importance selon l'étendue considérée.

- Les variables dont la contribution est marginale, c'est-à-dire qui n'agissent que ponctuellement selon l'étendue et/ou la résolution. C'est par exemple le cas des expositions 3×3 et 5×5, de la rugosité 3×3, 5×5 et 20×20. Ces

variables ont une action qui n'est pas significative sur la distribution de l'occupation du sol.

	altitude	exposition (3x3)	exposition (5x5)	exposition (9x9)	rugosité du relief (3x3)	rugosité du relief (5x5)	rugosité du relief (20x20)	rugosité du relief (30x30)	relief local relatif (20x20)	relief local relatif (30x30)	durée d'insolation théorique	indice topographique	distance aux tourbières	distance aux crêtes	distance aux zones humides	type de formations superficielles	fréquentation animale	utilisation	exploitation des surfaces		
z3nI																				20 m	
																				30 m	
																				40 m	
																				50 m	
																				60 m	
																					70 m
																					80 m
																					90 m
																					100 m
	z3nII																				20 m
																				30 m	
																				40 m	
																				50 m	
																				60 m	
																				70 m	
																				80 m	
																				90 m	
																				100 m	
z3nIII																					20 m
																				30 m	
																				40 m	
																				50 m	
																				60 m	
																				70 m	
																				80 m	
																				90 m	
																				100 m	
	z3nIV																				20 m
																				30 m	
																				40 m	
																				50 m	
																				60 m	
																				70 m	
																				80 m	
																				90 m	
																				100 m	

Figure 96 : Variables contribuant aux différentes résolutions et étendues (zone 3)

Si les variables dominantes ont un impact certain sur l'organisation du paysage, on peut en revanche s'interroger sur le sens à donner à une variable ne contribuant à une seule résolution par rapport aux variables contribuant à toutes les résolutions.

Quoi qu'il en soit, il semble que les variables dominantes doivent être incluses de manière prioritaire à toute analyse concernant le système étudié.

#### 6.3.1.4 Spécificité et variation de l'étendue

Les spécificités de chacun des types d'occupation du sol sont affectées de façons diverses par la variation de l'étendue (figure 97).

Certains types sont plus affectés que d'autres. Par exemple la spécificité du type « recolonisation forestière » est celle qui est le moins affectée par la variation de l'étendue. En revanche, la spécificité du type « sols nus » semble en être plus dépendante. En observant l'ensemble des graphiques reportés sur la figure, on note (à l'exception du type « conifères ») que la courbe correspondant au niveau I est celle qui s'éloigne le plus d'une « normalité » qui serait représentée par la courbe de l'étendue de niveau IV.

Il est en effet logique de supposer qu'un nombre plus grand de cellules permet de cerner de façon plus précise les besoins en terme de niches paysagiques de chacun des types.

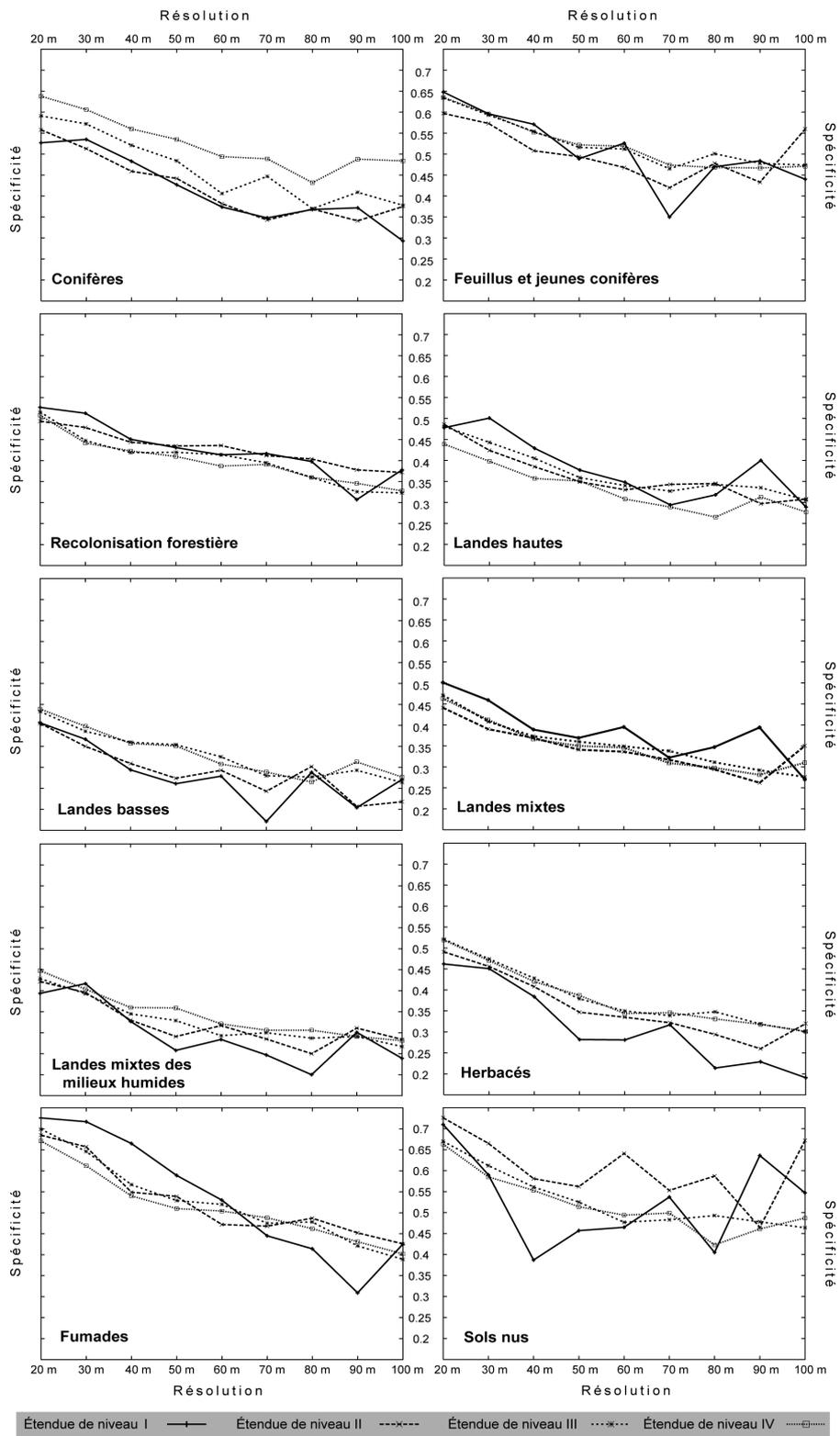


Figure 97 : Évolution de la spécificité des types d'occupation du sol en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3)

### 6.3.1.5 Tests de succès et variation de l'étendue

Les tests de succès (figures 98 et 99) qu'ils soient primaires (T) ou secondaires globaux ( $T'_g$ ) ne sont pas non plus affectés significativement par la variation de l'étendue. On observe donc, quelle que soit l'étendue, une diminution significative des résultats à ces tests.

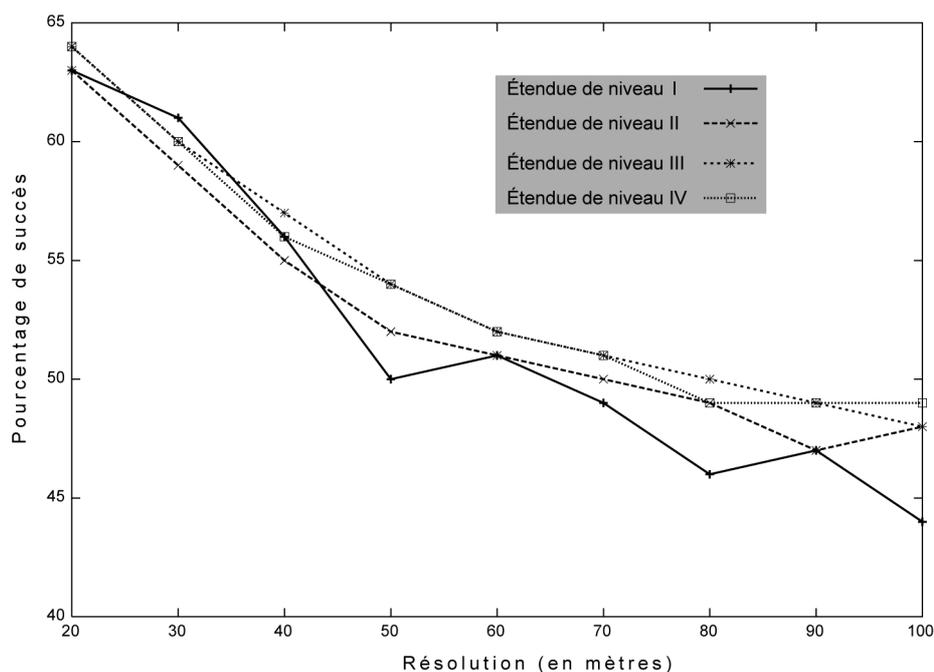


Figure 98 : Évolution du pourcentage de test de succès primaires en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3).

Pour les tests de succès primaires (figure 98), cette diminution est d'autant plus importante que l'étendue est faible, l'amplitude entre les courbes de niveaux I et IV augmentant globalement. D'autre part, l'étendue de niveau I montre des résultats très erratiques. En fait, le nombre de cellules prises en compte dans l'analyse influence les résultats des tests, chacune des courbes voyant son aspect se dégrader à partir de la résolution correspondant au nombre seuil de cellules (2000 dans notre cas).

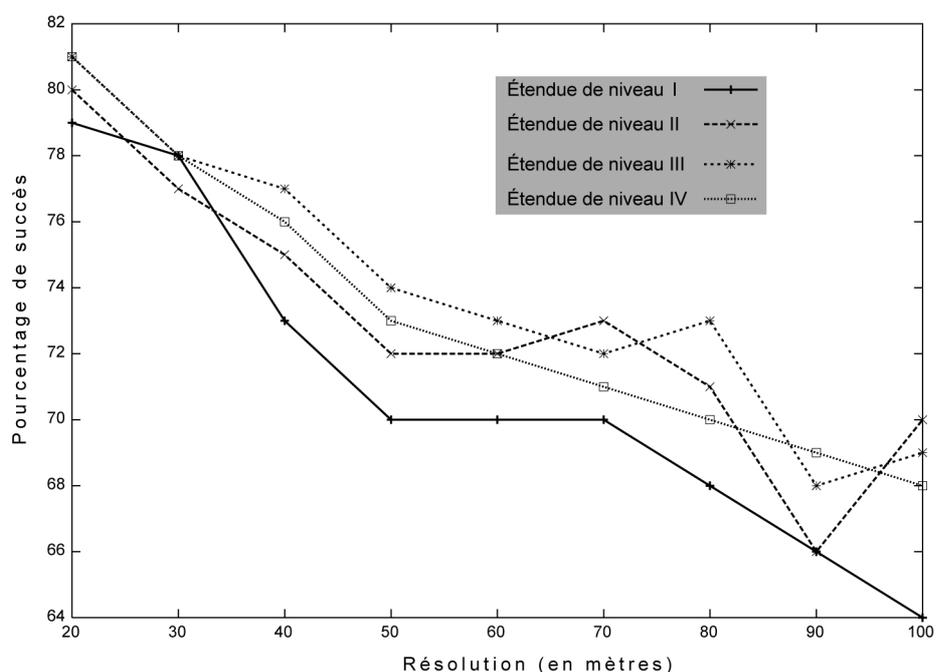


Figure 99 : Évolution du pourcentage du test de succès secondaire global en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3)

Les tests de succès secondaires globaux (figure 99) présentent une évolution assez proche de celle des tests de succès primaires, tout en étant nettement inférieurs. Ceux de l'étendue de niveau IV décroissent de manière régulière contrairement aux autres étendues, marquée par la diminution du nombre de cellules due à la baisse de la résolution.

Les tests de succès secondaires de chaque type d'occupation du sol (figure 100) sont peu différents d'une zone à l'autre dans la majorité des cas (« landes mixtes », « landes basses », « fumades »...).

Ces classes ne semblent affectées que par la diminution du nombre de cellules. Par contre, « conifères » ou « sols nus », présentent des résultats très variables d'une étendue à l'autre. Enfin, on remarque, pour les « landes hautes », que les regroupements qui apportaient succès aux étendues I, II et III n'ont pas la même réussite au niveau IV.

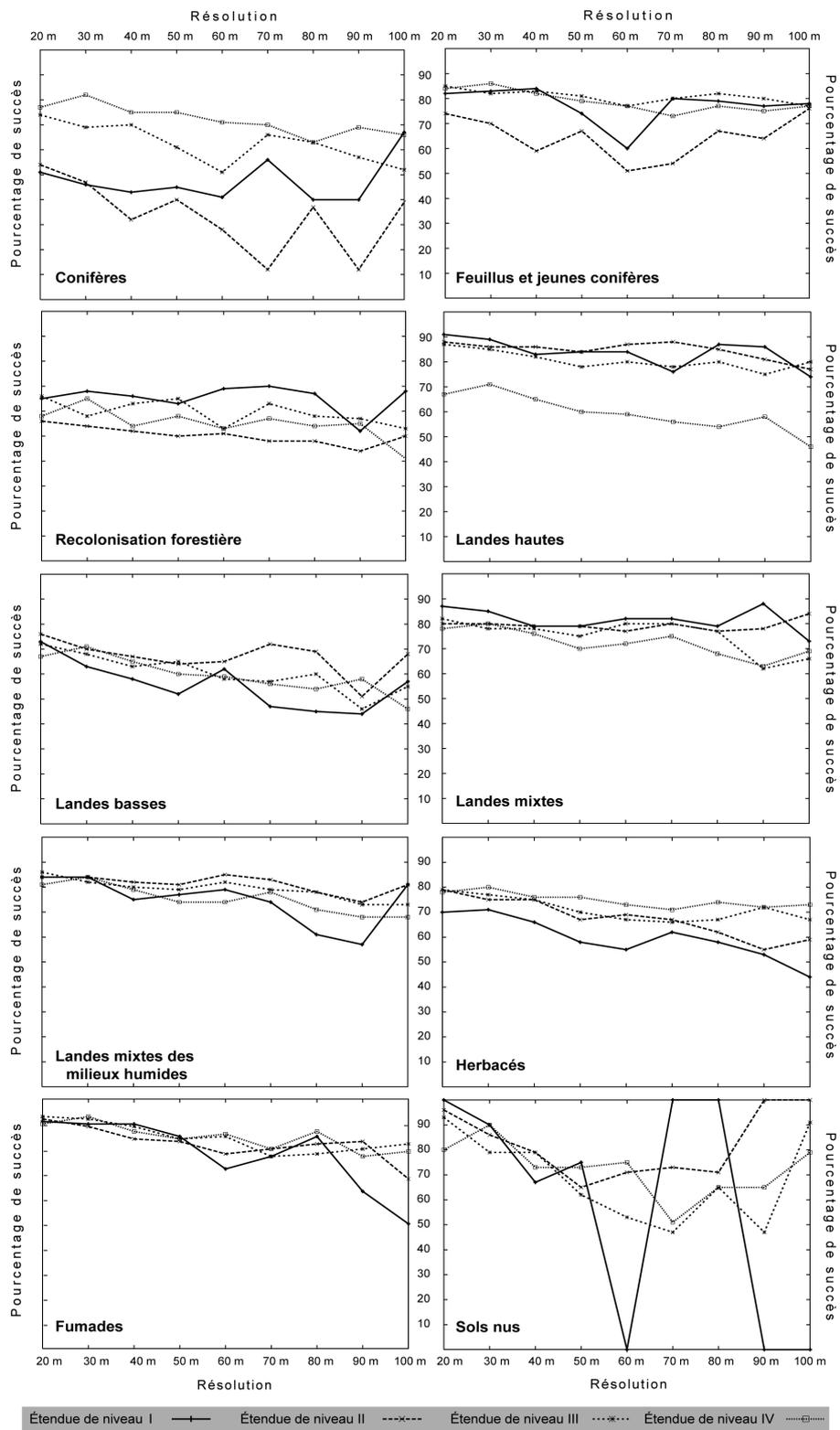


Figure 100 : Évolution du pourcentage de succès secondaires en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3)

### 6.3.2 ... pour une résolution donnée et pour chaque zone

Nous avons donc choisi de faire varier le niveau d'étendue à la résolution 20 m qui, nous l'avons vu lors de l'étude des zones 3 de niveau I à IV, permet d'obtenir la meilleure néguentropie.

#### 6.3.2.1 Redondance et complexité

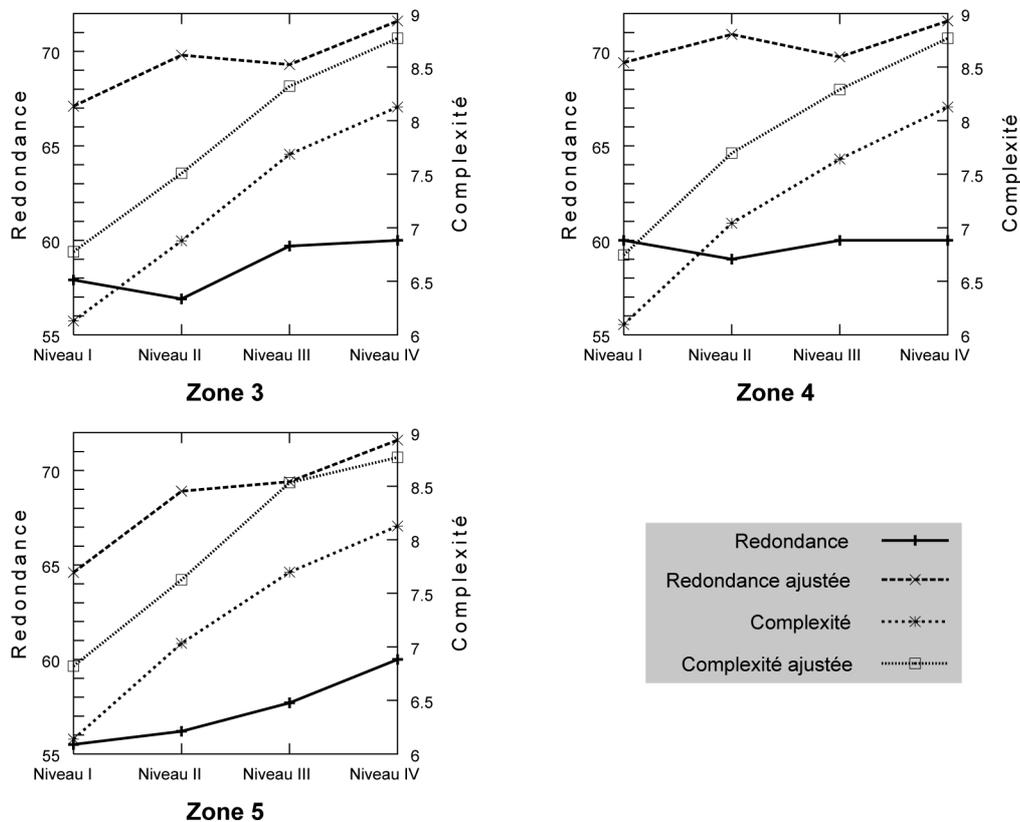


Figure 101 : Évolution de la redondance et de la complexité en fonction de l'étendue pour chaque zone 3, 4 et 5.

La redondance semble évoluer de façon irrégulière en fonction de l'étendue au sein des zones 3 et 4. La zone 5 semble répondre de façon différente, la redondance augmentant de façon régulière avec l'étendue. Plus généralement, au vu de ces résultats, l'augmentation de l'étendue ne semble pas être systématiquement synonyme de gain de redondance.

La complexité, quant à elle, croît de façon régulière avec cependant une tendance à la stabilisation aux grandes étendues.

Ces constatations mériteraient d'être éprouvées avec un nombre d'étendues plus grand.

### 6.3.2.2 Spécificités

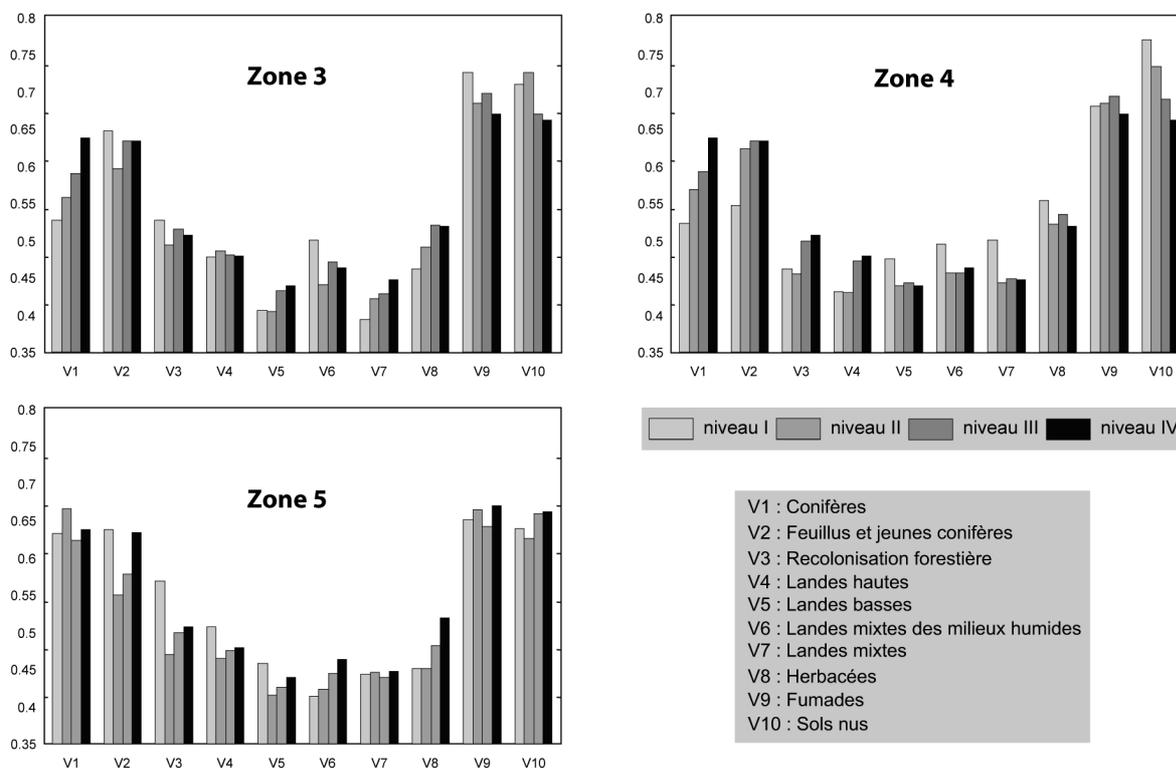


Figure 102 : Évolution de la spécificité de chaque classe de végétation en fonction de l'étendue pour chaque zone 3, 4 et 5

L'évolution des spécificités est variable d'une classe à l'autre et en fonction de la zone considérée. Si l'on retrouve, dans chaque cas, notre gradient caractérisé par sa forme en « U », il ne semble pas possible de généraliser un comportement quant à l'évolution de la spécificité d'une classe donnée en fonction de l'étendue.

### 6.3.3 Bilan

L'hypothèse 2 peut à présent être validée. En effet, nous avons montré qu'il était possible de sélectionner un certain nombre de variables en fonction de leur potentialité à s'exprimer de manière significative à de nombreuses échelles. Ces variables, que nous avons baptisées « variables dominantes », peuvent se voir attribuer un niveau de prédilection .

Afin de confirmer cette validation et d'amorcer celle de l'hypothèse 3, nous avons procédé à une comparaison des résultats obtenus avec les autres zones (zone 1,2, 4 et 5). Outre l'intérêt de présenter l'évolution de la redondance et des spécificités, cela va nous donner la possibilité de sélectionner d'autres variables dominantes au niveau de l'ensemble des Hautes Chaumes.

## 6.4 Comparaison des résultats avec les autres zones sélectionnées

### 6.4.1 Évolution de la redondance en fonction de l'étendue

La figure 103 résume les résultats obtenus pour chaque zone sélectionnée. Globalement, pour toutes les zones considérées, on observe une évolution de la redondance similaire à celle décrite pour la zone 3 :

- Augmentation de la redondance avec le nombre de cellules prises en compte, c'est à dire avec l'augmentation de la résolution et de l'étendue ;
- Un nombre de cellules insuffisant (le seuil se situant, dans le cadre de notre étude, aux alentours de 2000 cellules en fonction de l'étendue considérée). L'atteinte de ce seuil est généralement signalée par une discontinuité de la courbe de la redondance (soudaine augmentation, plateau ou chute brutale) accompagnée par une brusque augmentation de la redondance ajustée ;
- À chaque étendue peut être associée une résolution à partir de laquelle ce seuil est atteint : 30-40 m pour le niveau I, 60-70m pour le niveau II, 70- 80m pour le niveau III et 80-90m pour le niveau IV.

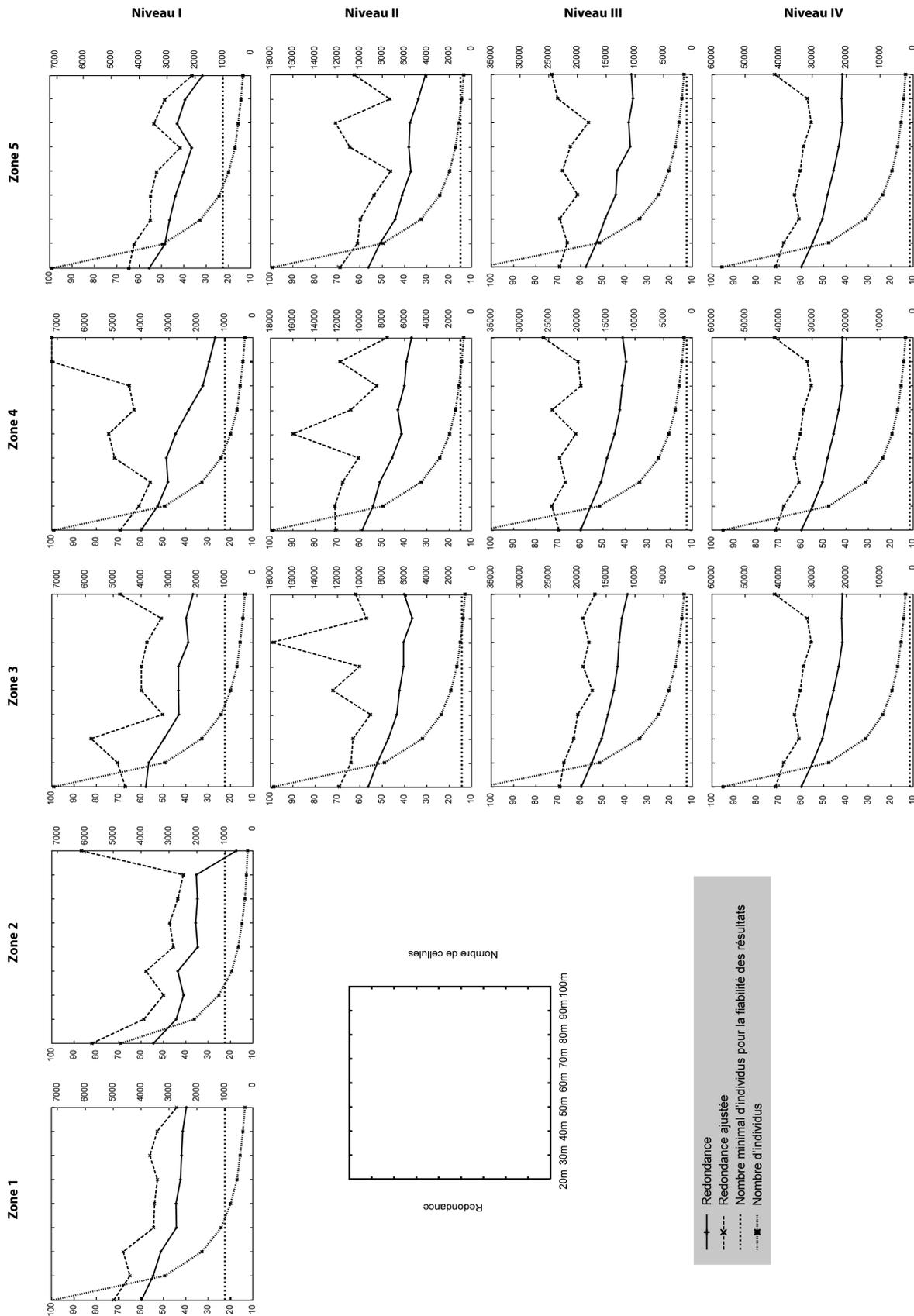


Figure 103 : Évolution de la redondance et de la redondance ajustée en fonction de la résolution , pour chaque zone et à chaque étendue

## 6.4.2 Évolution des spécificités en fonction de l'étendue

Quelle que soient la zone et le niveau d'étendue considérés, on observe la même organisation au sein des graphiques rapportant les spécificités de chaque classe de végétation en fonction de la résolution (figure 104).

Ainsi, le gradient écologique mis en évidence pour la zone 3 est identique quelle que soit la zone. Par contre, il est de mieux en mieux défini par l'augmentation de l'étendue et donc, par l'augmentation de la quantité d'information disponible pour mener à bien l'exécution la procédure.

On remarque cependant, qu'au niveau d'étendue I, il est plus ou moins marqué en fonction de la zone considérée et notamment pour les zones 1 et 2. Trois raisons semblent en être la cause :

- La différence de fréquences de chaque classe de végétation d'une zone à l'autre. Ces fréquences peuvent, par le jeu de la réduction de la résolution, varier de manière importante (cela explique les « trous » au niveau des « fumades » pour la zone 1) ;
- La localisation même de la zone qui va modifier les contraintes exercées par les variables explicatives ;
- L'effectif des individus de la zone 2 qui est plus faible que celui des autres zones de niveau I.

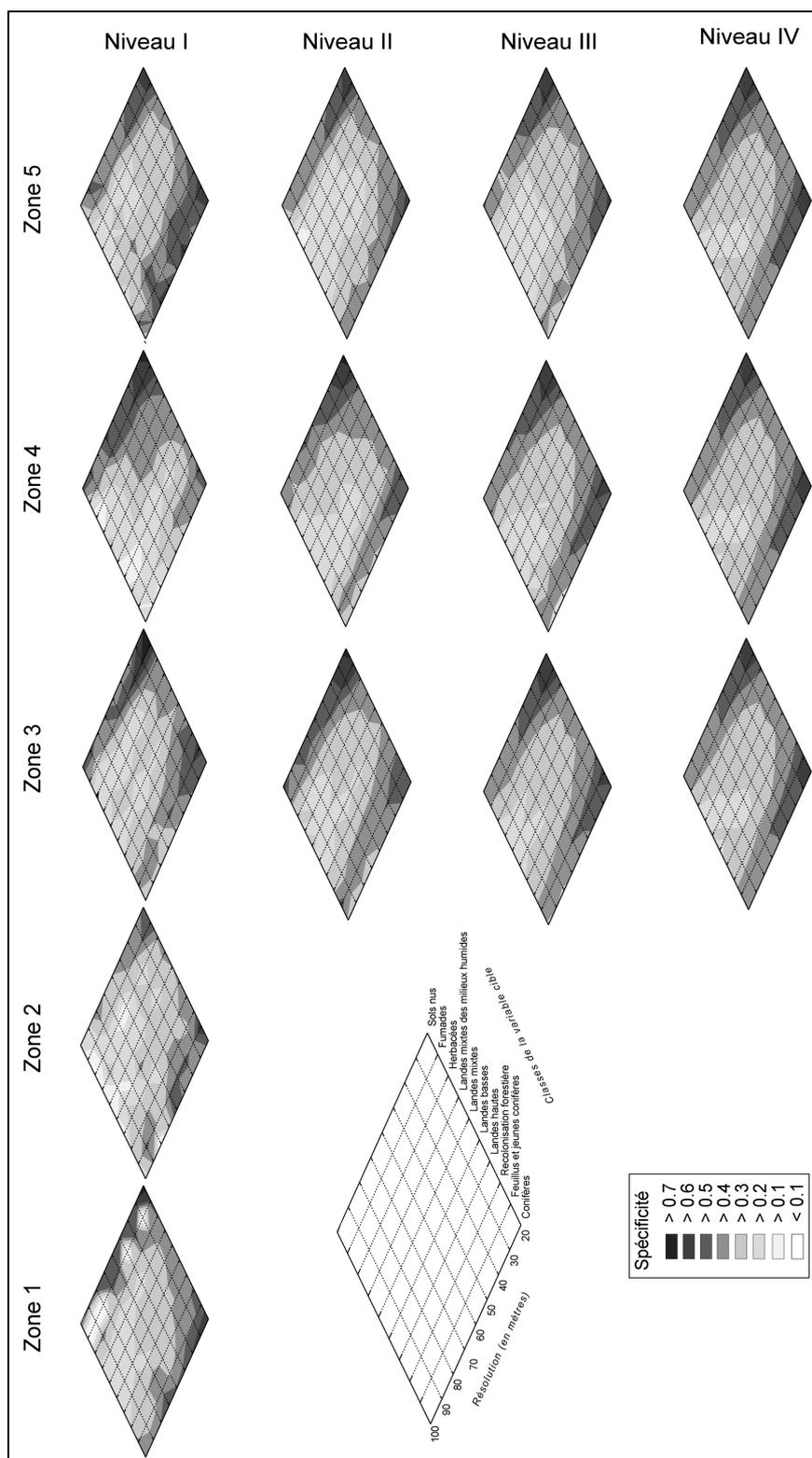


Figure 104 : Évolution de la spécificité des types de végétation en fonction de la résolution, pour chaque zone et à chaque étendue

### 6.4.3 Évolution des contributions en fonction de l'étendue

Pour chaque zone et pour chaque étendue, nous avons mis en place un tableau récapitulant les contributions de chaque variable explicative (figures 105 et 106). Leur comparaison permet de mettre en évidence certaines constances dans l'implication de ces variables.

Ainsi :

- les variables anthropiques semblent jouer un rôle important dans la structuration du territoire, principalement l'« utilisation » et l'« exploitation des surfaces » ;
- parmi les variables physiques, deux ressortent de manière significative : l'« exposition 9×9 » et le « relief local relatif 30×30 ».

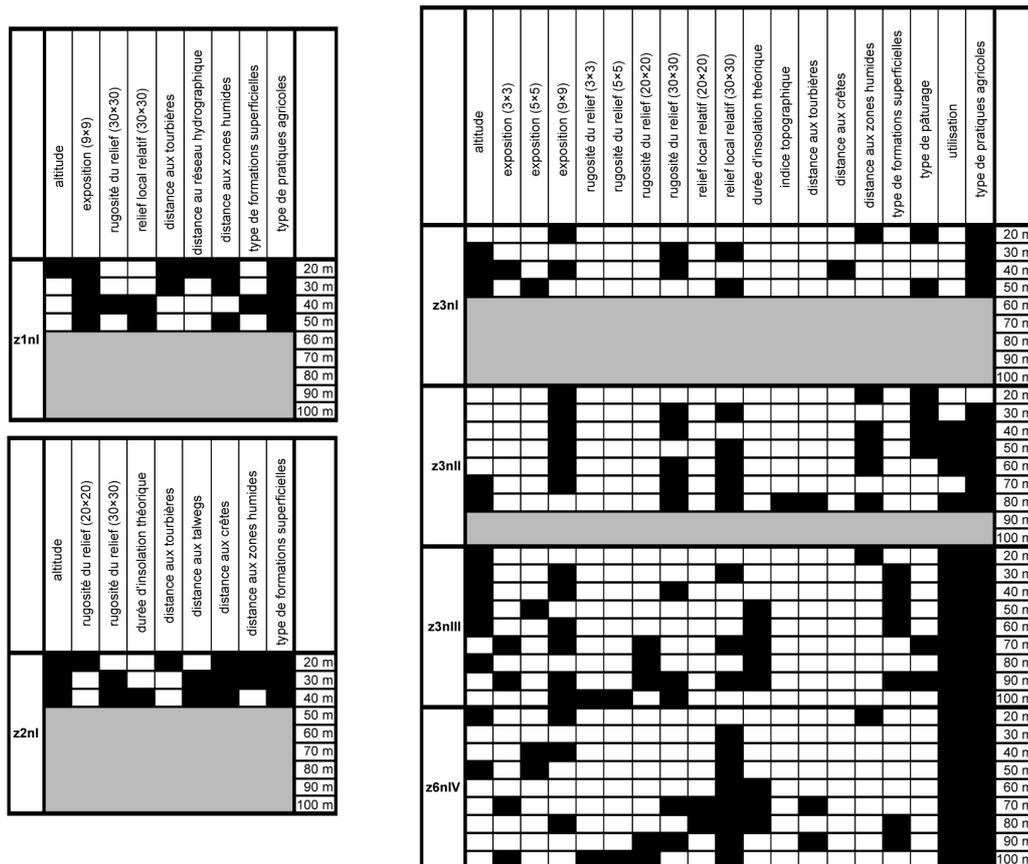


Figure 105 : Bilan des contributions des variables explicatives, pour les zones 1, 2 et 3, à chaque étendue

	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m									
type de pratiques agricoles																																				
utilisation																																				
type de pâturage																																				
conditions d'utilisation collective																																				
type de formations superficielles																																				
distance aux zones humides																																				
distance aux crêtes																																				
distance aux talwegs																																				
distance aux tourbières																																				
durée d'insolation théorique																																				
radiation solaire théorique																																				
relief local relatif (30×30)																																				
relief local relatif (20×20)																																				
rugosité du relief (30×30)																																				
rugosité du relief (20×20)																																				
rugosité du relief (9×9)																																				
rugosité du relief (5×5)																																				
rugosité du relief (3×3)																																				
courbure moyenne (9×9)																																				
pente (5×5)																																				
exposition (9×9)																																				
exposition (5×5)																																				
exposition (3×3)																																				
altitude																																				
	z5nI									z5nII									z5nIII									z6nIV								

	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m	80 m	90 m	100 m									
type de pratiques agricoles																																				
utilisation																																				
type de pâturage																																				
conditions d'utilisation collective																																				
type de formations superficielles																																				
distance aux zones humides																																				
distance aux crêtes																																				
distance aux tourbières																																				
durée d'insolation théorique																																				
relief local relatif (30×30)																																				
relief local relatif (20×20)																																				
relief local relatif (9×9)																																				
rugosité du relief (30×30)																																				
rugosité du relief (20×20)																																				
rugosité du relief (5×5)																																				
rugosité du relief (3×3)																																				
pente (9×9)																																				
exposition (9×9)																																				
exposition (5×5)																																				
exposition (3×3)																																				
altitude																																				
	z4nI									z4nII									z4nIII									z6nIV								

Figure 106 : Bilan des contributions des variables explicatives, pour les zones 4 et 5, à chaque étendue

Mais l'organisation de ces tableaux reste complexe. À l'instar de ce que nous avons fait pour la zone 3, il est possible de faire ressortir les variables que nous appelons « dominantes » (figure 107).

	Niveau I				Zone	Niveau I				
	I	II	III	IV		I	II	III	IV	
altitude					1					distance aux talwegs
					2					
					3					
					4					
					5					
exposition (5×5)					1					distance aux crêtes
					2					
					3					
					4					
					5					
exposition (9×9)					1					distance aux zones humides
					2					
					3					
					4					
					5					
rugosité du relief (30×30)					1					type de formations superficielles
					2					
					3					
					4					
					5					
relief local relatif (30×30)					1					parcellaire
					2					
					3					
					4					
					5					
radiation solaire théorique					1					fréquentation animale
					2					
					3					
					4					
					5					
durée d'insolation théorique					1					utilisation
					2					
					3					
					4					
					5					
distance aux tourbières					1					exploitation des surfaces
					2					
					3					
					4					
					5					

Figure 107 : Bilan des contributions des variables explicatives dominantes, pour chaque zone et à chaque étendue

Rappelons que nous considérons une variable explicative comme dominante lorsqu'elle contribue de manière significative à au moins la moitié des résolutions considérées.

On remarque alors de façon plus générale ce que nous avons déjà observé pour la zone 3 seule, à savoir l'existence de niveaux d'étendue de prédilection pour chaque variable (niveau auquel une variable est dominante pour au moins une zone) (figure 108).

	Niveau I			
	I	II	III	IV
durée d'insolation théorique				
radiation solaire théorique				
distance aux tourbières				
fréquentation animale				
type de formations superficielles				
altitude				
exposition (5×5)				
parcellaire				
distance aux talwegs				
distance aux crêtes				
rugosité du relief (30×30)				
distance aux zones humides				
exposition (9×9)				
relief local relatif (30×30)				
exploitation des surfaces				
utilisation				

Figure 108 : Les variables explicatives dominantes et leur niveau d'étendue de prédilection

Les zones que nous avons choisies pour mener à bien notre étude possèdent à la fois les caractéristiques de la totalité des Hautes Chaumes mais également des propriétés intrinsèques, liées à leur localisation ou à la distribution de leur couvert végétal.

Leur étude comparée nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de facteurs qui semblent intervenir dans l'organisation de l'ensemble du terrain d'étude. Cependant, leur intervention est complexe et dépend fortement de l'échelle considérée, que ce soit la résolution ou l'étendue.

Mais ces résultats doivent encore être validés. Pour cela, il nous faut tester le modèle sur l'ensemble du terrain d'étude.

#### 6.4.4 Bilan

Nous avons sélectionné 16 variables à partir de l'analyse de différentes zones des Hautes Chaumes à différentes échelles. Nous considérons ces zones comme représentatives de l'ensemble du territoire. Pour éprouver l'hypothèse 3 et montrer si les variables dominantes ont une influence prépondérante sur les autres, nous avons mis en place une méta-base de données Pegase à l'échelle des Hautes Chaumes.

### 6.5 La base de données Hautes Chaumes : une méta-base de données Pegase

Nous avons choisi de présenter les résultats obtenus pour l'ensemble du territoire des Hautes Chaumes à la résolution 20m. Pour ce faire nous avons mis en place une base de données de grande taille puisqu'elle comporte 212 071 cellules, ce qui représente un nombre considérable. Afin de l'alléger, nous n'avons pas tenu compte des indices estimés pour des noyaux de 3 et 5 cellules, sauf pour l'exposition, leurs contributions s'étant révélées tout de même importantes dans l'ensemble des traitements réalisés. Cette base de données comporte donc 33 variables explicatives plus la variable cible.

Nous avons analysé cette base de données dans trois conditions :

- En activant l'ensemble des 33 variables explicatives incluses dans la base. Nous étiquetterons l'analyse « Base HC 1 » ;
- En activant uniquement les 16 variables dominantes : « Base HC 2 » ;
- En activant uniquement les 17 variables non-dominantes : « Base HC 3 ».

La particularité de cette base de données est que nous avons dû reclasser la rugosité et le relief local relatif. En effet, sur l'ensemble de la zone, le nombre de classes de ces indices estimés à l'aide de larges fenêtres de cellules était supérieur à 30, ce qui n'est pas accepté par Pegase. Ce reclassement a été effectué par tranche de 8 m<sup>2</sup> pour la rugosité et de 30m pour le relief local relatif, soit le double par rapport aux autres bases de données. Nous proposons ci-dessous une étude comparée des résultats de ces trois bases de données.

### 6.5.1 Chute de l'entropie et augmentation de la complexité

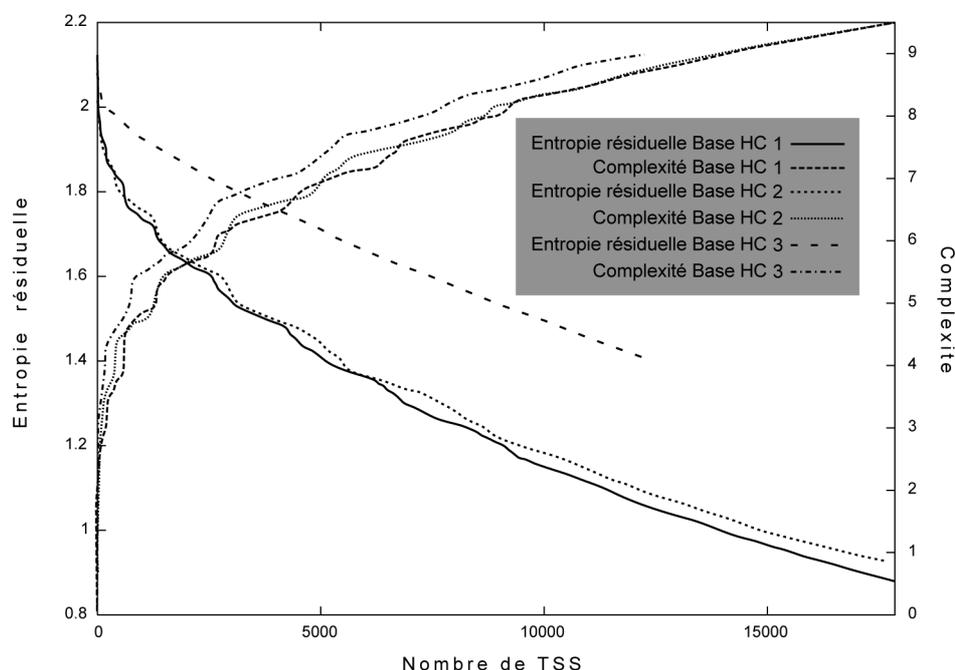


Figure 109 : Diminution de l'entropie et augmentation de la complexité

L'entropie résiduelle diminue au fil de la création, par la procédure divisive, des « *Terminal Sub Sets* » (figure 109). Parallèlement, on note logiquement une augmentation de la complexité du système.

	Base HC1	Base HC2	Base HC3
Entropie initiale	2.122	2.122	2.122
Entropie finale	0.882	0.925	1.368
Négentropie	1.241 (1.561)	1.197 (1.507)	0.754 (1.364)
Redondance	58.4% (73.5%)	56.4% (71%)	35.5% (64.3%)
Complexité	9.468 (10.086)	9.442 (10.063)	9.16 (9.83)

Tableau 19 : Résultats de la procédure divisive (pour l'ensemble du territoire des Hautes Chaumes à la résolution 20m) (les valeurs ajustées sont reportées entre parenthèses)

À l'issue des deux procédures, on obtient les résultats reportés dans le tableau 19.

On note que la redondance est de 58,2% pour la base contenant toutes les variables (HC 1) et 56,4% pour la base constituée des variables dominantes (HC 2). Ces dernières permettent donc de décrire de façon presque aussi satisfaisante l'organisation du système. À 2% de redondance près, on explique aussi bien la néguentropie avec deux fois moins de variables.

Ces valeurs sont respectivement inférieures de 1,8% et 3,6% à celles observées pour la zone de niveau IV.

Il faut tout de même rappeler que les variables qui ont été exclues des ces deux analyses contribuent elles aussi, même de façon infime, à l'entropie du système. Ainsi, on peut sans risque avancer qu'en incluant ces variables, on aurait obtenu un résultat au moins égal à celui de la zone de niveau IV.

Lorsque l'on ne prend en compte que les variables non-dominantes, on note une redondance particulièrement faible : 35,5%. Il est clair que l'ensemble des variables alors sélectionnées ne cernent pas de manière satisfaisante le système.

### 6.5.2 Les contributions

Pour la base HC 1, on note que 7 variables ont une contribution supérieure à 5% (figure 110). Toutes, sauf la « distance au réseau hydrographique » ont été identifiées, dans les traitements précédents, comme variables dominantes. On peut cependant arguer du fait que cette variable est très proche des « distances aux talwegs ».

Les résultats obtenus avec la base montre une augmentation de la contribution des variables dominantes, sauf l'altitude.

Ainsi, au sein de la base HC 1 le rôle effectif des variables dominantes est masqué par d'autres variables corrélées avec elles ce qui entraîne un masquage de leur pertinence.

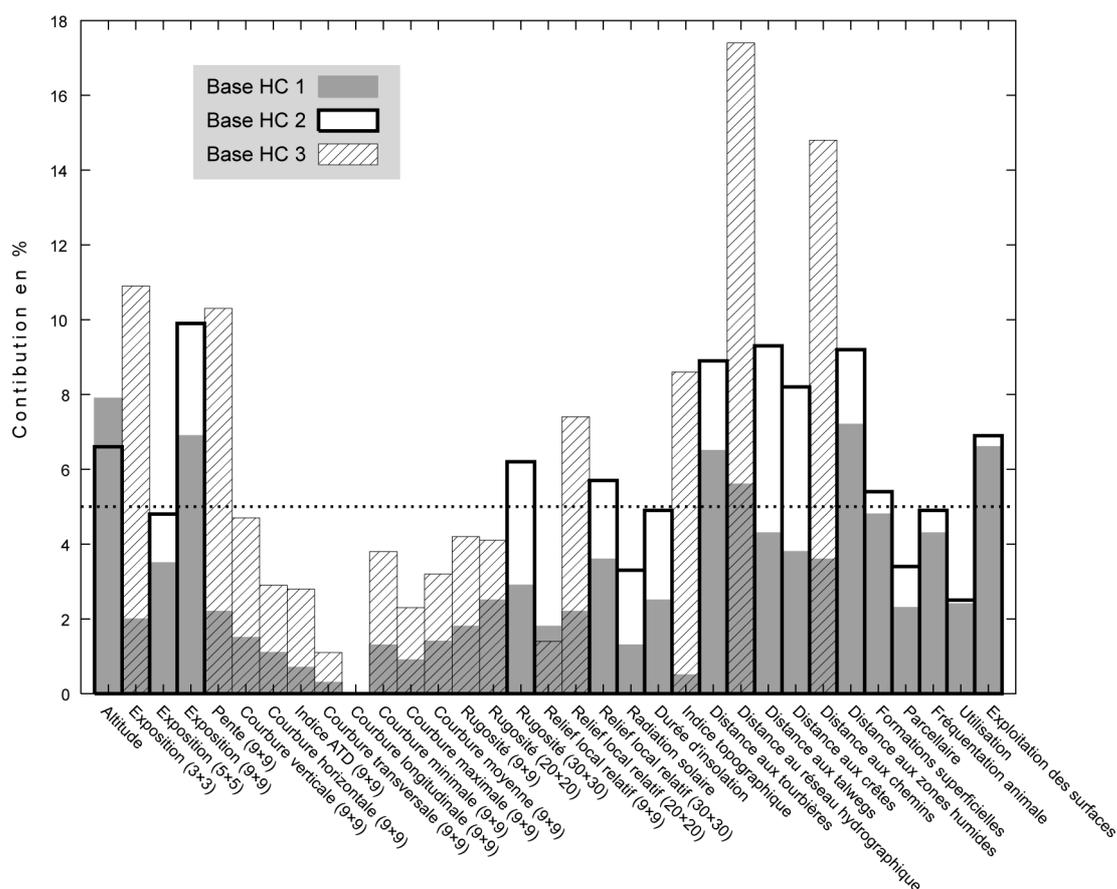


Figure 110 : Contributions des différentes variables explicatives à la négentropie (territoires des Hautes Chaumes à la résolution 20m)

### 6.5.3 Les spécificités

Les spécificités des différentes classes de la variable cible sont en accord avec celles observées pour chaque zone à chaque étendue (figure 111). La configuration du graphique (dépendant, rappelons le, de l'ordre des classes) fait de nouveau apparaître un gradient.

La baisse de spécificité entre les bases HC 1 et 2 semble être de même ampleur quelle que soit la classe considérée.

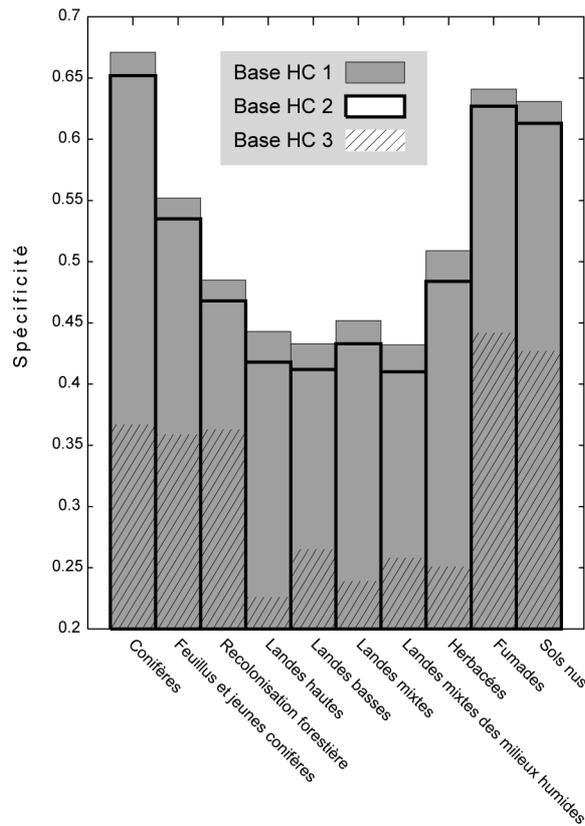


Figure 111 : Spécificités des différentes classes de la variable cible (territoires des Hautes Chaumes à la résolution 20m)

#### 6.5.4 Matrice de succès

Les matrices de succès (figures 112, 113 et 114) montrent les mêmes confusions entre les variables :

- « conifères » et « feuillus et jeunes conifères » sont confondus entre eux mais également avec les « landes hautes » ;
- « recolonisation forestière » avec les « landes basses » et , dans un moindre mesure, avec les « feuillus et jeunes conifères » et « herbacées » ;
- les différents types de landes sont eux aussi source de confusion, entre eux, mais également, pour les « landes mixtes » avec les « herbacées » ;
- les « fumades » et les « sols nus » sont confondus, de manière importante, avec les « herbacées ».

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	67	11		10						
V2	17	49		13						
V3		11	35		18			12		
V4				51	10		10			
V5				16	41	11	5			
V6				10		49		18		
V7				18		14	40	11		
V8						13		60		
V9								33	49	
V10								34		41

Figure 112: Matrice de succès (Base HC 1, Hautes Chaumes, résolution 20m)

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	38	9		14						
V2	14	32		14						
V3		11	25		15			14		
V4				33	10		10			
V5				15	28	12	7			
V6				14		31		20		
V7				17		15	26	16		
V8						14		40		
V9								27	28	
V10								26		18

Figure 114: Matrice de succès (Base HC 3, Hautes Chaumes, résolution 20m)

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	65	12		11						
V2	18	48		12						
V3		11	33		18			12		
V4				49	10		10			
V5				17	40	12	5			
V6				10		48		19		
V7				19		14	38	12		
V8						14		58		
V9								34	48	
V10								33		39

Figure 113: Matrice de succès (Base HC 2, Hautes Chaumes, résolution 20m)

Rappel :

- V1 : Conifères
- V2 : Feuillus et jeunes conifères
- V3 : Recolonisation forestière
- V4 : Landes hautes
- V5 : Landes basses
- V6 : Landes mixtes
- V7 : Landes mixtes des milieux humides
- V8 : Herbacées
- V9 : Fumades
- V10 : Sols nus

On note cependant que, dans le cas de la base HC 3, le succès des prédictions est faible quelle que soit la variable considérée.

Cette même matrice, après regroupement en fonction de nos observations (figures 115 et 116), permettent de faire augmenter de façon significative les prédictions justes.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	78			10						
V2		66		13						
V3			46		18			12		
V4				71						
V5					73					
V6						59		19		
V7							72	11		
V8						13		60		
V9									82	
V10										75

Figure 115 : Matrice de succès après regroupement (Base HC 1, Hautes Chaumes, résolution 20m)

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	47			14						
V2		46		14						
V3			36		15			14		
V4				53						
V5					62					
V6						45		20		
V7							58	16		
V8						14		40		
V9									55	
V10										44

Figure 117 : Matrice de succès après regroupement (Base HC 3, Hautes Chaumes, résolution 20m)

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	77			11						
V2		66		12						
V3			44		18			12		
V4				69						
V5					74					
V6						58		19		
V7							71	12		
V8						14		58		
V9									82	
V10										72

Figure 116 : Matrice de succès après regroupement (Base HC 2, Hautes Chaumes, résolution 20m)

Rappel :

- V1 : Conifères
- V2 : Feuillus et jeunes conifères
- V3 : Recolonisation forestière
- V4 : Landes hautes
- V5 : Landes basses
- V6 : Landes mixtes
- V7 : Landes mixtes des milieux humides
- V8 : Herbacées
- V9 : Fumades
- V10 : Sols nus

Trois grands types de confusions perdurent cependant :

- « types forestiers » avec « landes hautes » ;
- « recolonisation forestière » avec « landes basses » et « herbacées » ;
- « landes » et « herbacées ».

Cependant, nos regroupements sont validés par les tests de succès.

En revanche, les regroupements ne permettent pas d'améliorer de manière significative les succès de prédiction dans le cas de la base HC 3.

### 6.5.5 Tests de succès

Base		HC1	HC2	HC3
Test de succès primaire (T)		61%	61%	44%
Test de succès secondaire global (T'g)		80%	79%	64%
Tests de succès secondaires (T')	VE1	87%	87%	63%
	VE2	81%	81%	60%
	VE3	58%	57%	48%
	VE4	84%	83%	70%
	VE5	78%	78%	66%
	VE6	81%	80%	68%
	VE7	82%	81%	68%
	VE8	77%	75%	60%
	VE9	89%	89%	66%
	V10	85%	81%	52%

*Figure 118 : Résultats des tests de succès pour les bases HC 1, 2 et 3 Hautes Chaumes, résolution 20m*

Les regroupements permettent de faire augmenter les résultats à ces tests de 61% (test primaire) à 80% (test secondaire global). Les tests secondaires individuels sont également probants, sauf peut-être pour le type « recolonisation forestière » (figure 118).

On note de nouveau la faiblesse des résultats obtenus à partir de la base HC 3.

### 6.5.6 Bilan

Tous les résultats présentés ci-dessus montrent l'importance de l'action des variables dominantes sur l'organisation du paysage des Hautes Chaumes. A elles seules, ces variables, contrairement à celles qui ne sont pas dominantes, contribuent pratiquement autant à cette organisation que toutes les variables réunies.

Il nous est dès lors possible de valider notre hypothèse 3 : les variables explicatives qui s'expriment à de nombreuses échelles, c'est-à-dire les variables dominantes, ont un rôle primordiale dans l'organisation des paysages.



## Chapitre 7 : Synthèse et discussion

### 7.1 Synthèse des résultats

#### 7.1.1 Considérations d'ordre général

Les différents résultats obtenus et présentés au chapitre 6 nous apportent un certain nombre d'informations en fonction de la manière dont ils sont analysés. En effet, chaque zone de traitement peut être considérée de manière individuelle, ou alors comparée en fonction de l'évolution de la résolution et/ou de l'étendue.

##### 7.1.1.1 Le déroulement de la procédure divisive

Quelle que soit la zone considérée, le processus d'analyse s'est déroulé de façon satisfaisante, permettant la chute de l'entropie résiduelle et l'augmentation de la complexité au fur et à mesure de l'exécution de la procédure divisive, et ce, indépendamment du nombre de cellules considérées, et donc de l'étendue et de la résolution.

##### 7.1.1.2 La redondance et la complexité

Globalement, nous avons pu observer qu'un nombre important d'individus permettait l'obtention d'une redondance plus importante, les meilleurs résultats étant obtenus pour les zones de fortes étendues et à de fortes résolutions. Il en va de même pour la complexité. Il est clair que plus l'étendue et le nombre de cellules sont grands, plus le processus de division se poursuit augmentant *ipso facto* la redondance et, par contre-coup, la complexité.

Cependant, il semble qu'apparaisse un effet de seuil au-delà duquel le gain d'information induit par l'augmentation de l'effectif ne suffit plus à améliorer les résultats.

Ainsi, pour une zone, l'augmentation de l'étendue permet celle de la redondance. Au contraire, une augmentation provoque l'effet inverse. De plus, afin de mener à bien

l'analyse, il est nécessaire de posséder un nombre minimal de cellules. Les analyses sur de faibles étendues ne peuvent donc pas être menées à de trop faibles résolutions. Cet effectif minimal peut être mis en évidence par le comportement de la redondance (et mieux encore de la redondance ajustée) en fonction de la diminution de la résolution. En effet, en dessous de ce nombre, les résultats adoptent un comportement erratique.

### 7.1.1.3 La spécificité

La complexité du système est elle aussi favorisée par le nombre de cellules pris en compte.

La spécificité des classes de la variable cible semble peu dépendante de la résolution et de l'étendue. En effet, si les valeurs peuvent fluctuer pour une classe donnée, d'une zone à l'autre elles conservent le même ordre de grandeur les unes par rapport aux autres. Il est évident qu'une plus grande quantité d'information, induite par un nombre de cellules plus important, permet une meilleure caractérisation des « niches paysagiques ». Ceci est visible dans le cas de zones où certaines classes possèdent des effectifs faibles ne permettant pas de cerner convenablement les contraintes auxquelles sont soumises leur distribution. Mais les résultats ne sont pas significativement améliorés par l'utilisation de zones de très forte étendue. De plus, l'étude des valeurs de spécificité peut conduire à la mise en évidence de gradients écologiques relevant de facteurs physiques, climatiques, anthropiques...

### 7.1.1.4 Les contributions

Les contributions des variables explicatives à la néguentropie sont dépendantes de la zone considérée, de la résolution et de l'étendue.

Les variables contributives varient d'une zone à l'autre. Cela dépend de deux éléments : la distribution de la valeur cible au sein de la zone et les facteurs physiques et anthropiques locaux.

Au sein d'une même zone, la contribution de ces variables peut varier considérablement d'une résolution à l'autre. Ainsi, certaines s'expriment seulement à certaines résolutions. D'autres le font à toutes les résolutions ou presque . Il est possible

d'isoler ces dernières. Nous leur avons donné le nom de « variables dominantes » qui contribuent à plus de la moitié des résolutions considérées.

De la même façon, une telle variable peut s'exprimer à une étendue donnée, mais pas à une autre. Il est alors possible de mettre en évidence, pour une variable donnée, des niveaux d'étendue de prédilection à la contribution.

En réalisant l'analyse sur la totalité de la zone, à une forte résolution, on s'aperçoit qu'un tiers des variables, les « variables dominantes », contribuent à pratiquement la même réduction de l'entropie du système que toutes les variables réunies.

Ainsi, la mise en évidence des variables contribuant à l'organisation du paysage ne peut être complète avec la mise en pratique d'une analyse à une seule et même échelle. En effet, l'analyse de la totalité de la zone occulte des variables qui avaient pourtant été sélectionnées pour les autres analyses.

L'étude de ces contributions fait donc ressortir l'intérêt des analyses multiéchelles dans le cadre de l'utilisation de la procédure Pegase. Ainsi, malgré l'homogénéité structurelle d'un territoire, l'analyse sur la totalité de la zone, même à une forte résolution induisant une quantité maximale d'information, ne suffit pas à cerner de façon précise son organisation. Tout au plus, cette analyse est globale, mais sous-estime l'influence de certaines variables. Cela est bien illustré par la néguentropie provoquée par les variables dominantes seules.

De la même façon, on ne peut se contenter de l'analyse d'une zone échantillon pour extrapoler les résultats à l'ensemble du territoire.

#### 7.1.1.5 Les matrices de succès

Les matrices de succès nous apportent des informations importantes sur les liens existants entre les différentes classes de la variable cible. Elles mettent en exergue les confusions qui peuvent exister, au cours de la procédure d'analyse, entre des classes. Cela permet de mener une réflexion sur ces éventuelles confusions.

Il est cependant nécessaire de rappeler que la prédiction est fondée sur les relations avec le milieu (définies par l'ensemble des variable explicative) et non sur les

caractéristiques propres aux classes de la variables cibles. Par exemple, deux types reliés par une succession temporelle se développant dans des milieux similaires peuvent s'avérer responsables de nombreuses confusions. Ces dernières ne seraient pas des erreurs à part entière, mais résulteraient du fait que l'information sur la dynamique du phénomène n'a pas été prise en compte.

Il est pourtant nécessaire de s'interroger sur ces confusions de manière à en faire une interprétation qui pourrait permettre d'améliorer l'analyse du paysage.

#### 7.1.1.6 Les tests de succès

Les tests de succès que nous avons mis en place permettent d'effectuer cette interprétation et de tester certaines hypothèses quant aux liens existants entre certaines classes de la variable cible.

Le test primaire évalue la quantité de prédictions justes toutes classes confondues.

En fonction de regroupements *a priori*, basés par exemple sur des phénomènes écologiques connus, sur des confusions issues des données d'origine, on peut effectuer les tests secondaires. Le test secondaire global évalue la quantité de prédictions justes compte tenu des regroupements effectués. Le test secondaire (individuel) permet d'estimer le gain en prédictions justes sur une classe donnée de la variable cible.

Ces tests de succès se posent comme des indicateurs supplémentaires de la qualité des résultats obtenus et comme une aide à leur analyse.

#### 7.1.1.7 L'analyse des correspondances

Les résultats de l'analyse des correspondances fournie par Pegase sont parfois difficilement interprétables. La raison principale est l'impossibilité d'exclure une variable sans avoir à relancer l'analyse (ce qui peut être long dans le cas des très grandes bases de données). L'utilisation d'un logiciel de statistiques peut être une bonne alternative.

Cependant, l'analyse peut être fastidieuse et difficile à interpréter. Nous avons choisi de l'écartier, tout du moins dans le cadre de notre terrain d'étude.

### 7.1.2 La mise en évidence de « variables dominantes »

La mise en évidence des « variables dominantes » constitue un des points-clefs des résultats que nous avons obtenus. Ces variables sont celles, rappelons-le, qui contribuent de manière significative à plus de la moitié des résolutions considérées pour une zone ou une étendue donnée.

Nous avons montré l'importance de ces variables et la nécessité de leur prise en compte dans l'analyse du système. Leur mise en évidence permet de sélectionner les variables explicatives et ainsi de réduire la taille de la base de données.

Elles peuvent voir leur contribution à la néguentropie masquée par les variables non dominantes (qui, en général, leur sont corrélées), ce qui peut alors conduire à sous-estimer leur importance si elles n'ont pas au préalable été identifiées.

Enfin, nous avons déterminé que pour chaque variable explicative dominante, il existe un ou plusieurs niveaux d'étendue de prédilection auxquels cette variable est dominante pour au moins une zone.

La mise en évidence des variables dominantes au cours de notre recherche montre bien l'importance de l'utilisation de Pegase dans un contexte multiéchelle.

### 7.1.3 Le territoire des Hautes Chaumes

Dans le cadre de notre étude des Hautes Chaumes des Monts du Forez, nous avons atteint, à forte résolution, des redondances comprises entre 55,5 et 60%, en fonction de la zone et de l'étendue considérées. Pour chaque zone, les meilleurs résultats sont obtenus, comme indiqué précédemment, pour les résolutions les plus fortes.

Les différentes analyses nous ont amenés à la sélection d'un certain nombre de ces variables contribuant à la néguentropie et donc participant à l'organisation du paysage à diverses étendues et résolutions.

Ces variables dominantes permettent à elles seules de produire quasiment la même néguentropie que toutes les variables choisies réunies. Ces variables sont l'altitude, l'exposition (5×5 et 9×9), la rugosité du relief (30×30), le relief local relatif (30×30), la

quantité théorique de radiation solaire reçue, la durée théorique d'insolation, les distances aux tourbières, aux talwegs, aux crêtes, aux zones humides, les formations superficielles, le parcellaire, la fréquentation animale, l'utilisation et l'exploitation des surfaces.

Ces variables peuvent être regroupées en fonction de leur nature : la topographie locale, la disponibilité en eau et l'action anthropique. On note d'ailleurs que cette dernière participe, pour une bonne part, à la structuration du territoire, tout du moins dans la mesure on nous l'avons cernée. L'activité pastorale apparaît donc comme ayant un fort pouvoir structurant sur l'organisation du paysage des Hautes Chaumes.

L'étude des spécificités nous a, semble-t-il, permis de mettre le doigt sur l'existence d'un gradient écologique au sein des classes de la cartographie de la végétation. Ce gradient opposerait les classes à forte biomasse (les types forestiers) à celles à faible biomasse (fumades et sols nus).

Cependant, l'utilisation des matrices et des tests de succès nous a permis :

- De mettre en évidence un phénomène connu sur le territoire des Hautes Chaumes : la « recolonisation forestière » aux dépens des « landes » qui au sein de nos résultats se traduit par les confusions entre les types forestiers et les landes ;
- De soulever un certain nombre de problèmes quant à la caractérisation des types d'occupation du sol « fumades » et « sols nus » qui sont soumis à de nombreuses confusions dans la cartographie elle-même :
  - un certain nombre de fumades y apparaissent, par exemple, comme « herbacées » ou « landes »,
  - certains « sols nus » apparaissent comme « herbacées » ou « landes ».

Ces confusions sont facilement expliquées par deux causes principales :

- Les liens étroits qui peuvent exister, selon la parcelle considérée, entre les classes de la variable cible. Par exemple, les fumades sont constituées par des herbacées et ne se différencient entre elles qu'en terme d'usage. De même,

la fauche ou le labour de certaines pelouses peuvent les « transformer » en « sols nus » ;

- L'utilisation d'une cartographie issue d'une classification automatique en télédétection qui met en jeu les signatures spectrales des couvertures au sol et qui est dépendante des variations ponctuelles locales de ces couvertures (variations de type « fauche » ou « labour »).

#### 7.1.4 Pegase : outil potentiel d'aide en télédétection

La mise en évidence de ces confusions nous a fait entrevoir les éventuelles potentialités d'une utilisation de Pegase dans le cadre de travaux en télédétection et notamment lors de la mise en place de cartographies par classification automatique.

Ce positionnement de Pegase en tant qu'outil potentiel d'aide en télédétection n'a malheureusement pas pu être réellement validé. Rappelons qu'il s'agissait d'un objectif annexe que nous nous étions fixé au vu des premiers résultats obtenus. Cependant, ces potentialités demeurent, notamment du fait de la mise en évidence par Pegase de confusions au niveau de la cartographie. Nous reviendrons sur ce point dans le cadre du chapitre 8.2.3.

#### 7.1.5 Les progressions de Pegase au cours de notre recherche

Au fil de notre travail, Pegase a beaucoup évolué. Au cours de notre recherche, les bases de données que nous avons utilisées se sont avérées de plus en plus importantes et ont mis en exergue certaines limites. Nous avons tout au long de nos travaux fait part de nos remarques à Michel Phipps, concepteur de Pegase, qui a, au vu de ces dernières, procédé à des corrections dans le code du logiciel.

Ces mêmes bases de données auraient été très fastidieuses à mettre en place sans les outils que nous avons développés : Asc2Peg et XLPeg qui constituent pour nous une participation majeure à la progression de l'outil. Non seulement ils permettent de mettre en place ce que nous avons appelé des méta-bases de données (à l'échelle de Pegase), mais ils ancrent Pegase dans un contexte S.I.G. en automatisant l'importation de données au format ESRI ASCII Grid reconnu par nombre de logiciels.

Enfin, notre recherche aura placé Pegase dans une approche multiéchelle, ce qui représente une première. Or, nos résultats montrent que les variations d'échelle jouent un rôle important dans la caractérisation de l'organisation des paysages avec Pegase.

## 7.2 Discussion

### 7.2.1 Des résultats pas complètement satisfaisants

Tout d'abord, et quelle que soit la zone considérée, nous ne nous sommes jamais approchés de manière très satisfaisante d'une explication de l'organisation de l'occupation du sol. Au mieux, à l'aide des variables que nous avons sélectionnées parmi celles que nous possédions, nous n'avons « expliqué » qu'à 60% cette organisation. Bien que relativement important, ce résultat reste insuffisant puisque dans ce cas, 40% de l'organisation du paysage ne sont pas expliqués par les variables sélectionnées. Plusieurs raisons peuvent être avancées :

1. Le hasard possède une part non négligeable dans la distribution de la végétation même si on peut supposer qu'il ne saurait expliquer à lui seul 40% de l'organisation du paysage ;
2. Des facteurs importants n'ont pas été considérés parce que nous ne les possédions pas. Par exemple la distribution des différents types de sols (carte pédologique) pourrait jouer un rôle clef dans la distribution de la végétation ;
3. Nous n'avons pas cerné l'ensemble des variables qui pourraient intervenir dans le processus. Il faudrait donc envisager d'en inclure d'autres. En effet, il est certain que le paysage se forme et change en fonction d'une grande diversité de facteurs inhérents à différents domaines (écologie, climat, histoire, économie, etc.). L'idéal serait évidemment d'approcher cette globalité au plus près possible. Mais dans cette tentative, on se heurte forcément à des obstacles multiples et souvent difficiles à surmonter. Par exemple, on ne peut guère prétendre cerner les influences du micro-climat. On peut en revanche lui substituer un ensemble de variables topographiques

ou des estimations théoriques, elles-mêmes fondées sur la topographie. Cependant est-ce vraiment la même chose ? Il est, à défaut, envisageable d'évaluer la part d'organisation du paysage qui revient à un domaine donné qui nous intéresse particulièrement, le reste étant laissé de côté comme une entropie résiduelle qui absorbe en fait un déterminisme que l'on a choisi d'ignorer ;

4. Certaines variables que nous avons sélectionnées ne sont intervenues que de façon infime, voire nulle, alors que nous pensions que leur rôle serait important. C'est le cas par exemple des courbures. Deux raisons peuvent être avancées :

- Soit elles ne jouent en effet aucun rôle ,
- Soit leur estimation est tronquée par l'imprécision de la donnée source (le modèle numérique de terrain),
- Soit, leur rôle effectif est masqué par d'autres variables corrélées avec elles ce qui peut entraîner un masquage de leur pertinence. Une façon de tester cette hypothèse serait d'essayer d'identifier ces variables corrélées, puis de les exclure de l'analyse et de voir si les courbures entrent en scène après cette opération,
- La qualité des données est insuffisante.

## 7.2.2 La qualité des données

Ce dernier point doit être souligné de manière appuyée. En effet, il est possible que les données utilisées ne soient pas suffisamment représentatives de la réalité du terrain et des contraintes qui sont exercées sur le paysage.

Par exemple, nous nous sommes fortement interrogés sur les variables liées aux pratiques pastorales et sur l'atténuation de la légitimité de l'information, notamment par rapport au niveau des dates d'acquisition et par rapport à celle de la variable cible. Même s'il est indéniable que les Hautes Chaumes subissent de fortes contraintes, il est probable que les données dont nous disposons ne reflètent pas de manière satisfaisante la réalité de cette pression anthropique.

De nombreuses variables utilisées ont été estimées à l'aide de fenêtres flottantes de tailles différentes. À chaque fois, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les fenêtres les plus larges. Cela s'explique aisément par les observations réalisées au sein du chapitre 4.4. De plus larges fenêtres vont permettre de mieux cerner les grands traits du relief alors que les plus petites vont plutôt mettre en évidence les variations locales. Ce phénomène est donc à ne pas négliger : on ne doit pas se contenter d'utiliser une seule taille de fenêtre et il est nécessaire de mener une réflexion quant au choix de ces tailles .

Mais les seules variables explicatives ne sont pas à mettre en cause. En effet, on note l'existence d'erreurs d'interprétation lors de la mise en place de la cartographie de l'occupation du sol par télédétection. En effet, par comparaison entre la cartographie de la végétation et des photographies aériennes, nous avons observé de nombreuses erreurs de classements au sein des groupes « fumades » et « sols nus » impliquant également les « herbacées », « landes » et types « forestiers ». Or, ces confusions semblent clairement influencer la procédure divisive et être à l'origine d'une partie des confusions observées. L'utilisation des matrices et des tests de succès permettent d'ailleurs de les valider.

### 7.2.3 La variation d'échelle

Quoiqu'il en soit, l'influence de la résolution sur les différents résultats obtenus est indéniable. Sa diminution induit une perte d'information, réduisant la complexité du processus et conduit soit à la minimisation, soit à la maximisation de la contribution de certaines variables explicatives. Cependant, il convient de ne pas se contenter de mener une étude de l'organisation d'un paysage à une seule résolution au risque de ne pas appréhender l'action de toutes les variables. Par exemple, dans le cas de la zone 3 de niveau I (tableau 10 page 187), une simple étude à la résolution 20 m aurait écarté l'altitude comme variable importante alors qu'elle intervient à toutes les autres résolutions. Ainsi, ce n'est pas parce qu'une variable ne contribue pas à la négentropie à une échelle donnée qu'elle ne le fait pas à une autre.

D'autre part, il est fort probable que les études à haute résolution fassent apparaître des phénomènes de voisinage de cellules qui sont gommés par le ré-échantillonnage des cellules à basse résolution.

Cela confirme donc bien l'intérêt des études multiéchelles dans le cadre des analyses spatiales paysagères : on ne peut pas se contenter d'étudier un paysage, avec Pégase comme avec d'autres outils, à une seule et même résolution, sans négliger des aspects importants intervenant dans son organisation.

Notre étude apparaît, dans le cadre de l'utilisation de Pégase, comme novatrice puisque, à notre connaissance, aucune utilisation de la procédure n'a été envisagée selon une approche multiéchelle pourtant nécessaire aux types de problèmes abordés.

Cependant, faire varier l'échelle n'est pas sans conséquence sur la qualité de l'information. Si la variation de l'étendue ne l'influence pas, la diminution de la résolution est source de dégradation majeure de l'information. Ainsi, il est possible de s'interroger sur la baisse de la redondance accompagnant la diminution de la résolution. Si le nombre décroissant de cellules influence incontestablement le processus divisif, on peut se demander quelle est la part due à la dégradation de cette information dans la néguentropie.

#### 7.2.4 Le choix des zones

Bien qu'appartenant à un territoire relativement homogène, chacune des zones présente une organisation qui lui est propre. Ainsi, une simple étude de l'ensemble de ce territoire ne saurait être suffisante pour procéder à une analyse précise d'une zone plus restreinte. Toute extrapolation conduirait à une analyse plus qu'incomplète. De la même façon, l'étude d'une seule zone ne saurait expliquer l'organisation de la totalité du territoire.

Cependant, il y a une difficulté d'application de cette stratégie. De subdivision en subdivision, on aurait du mal à fixer le moment où on peut considérer que la portion analysée est structurellement homogène. Ainsi, se pose la question de la sélection des zones, de leurs étendues, de leurs résolutions.

Malgré cela, certaines constatations restent valables pour chacune des zones, légitimant par la même occasion les résultats obtenus pour chacune d'elles. Dans le cas de notre terrain d'étude, le premier comportement commun à la quasi-totalité des zones étudiées est l'existence, à l'issue du processus, de confusions entre différents types d'occupations du sol concernant les « types forestiers », les « landes hautes et basses » et

les « herbacées ». Ces confusions trouvent une explication logique à travers les phénomènes de recolonisation des milieux ouverts par les types forestiers.

Il pourrait d'ailleurs nous être reproché d'avoir mis en évidence un phénomène connu au niveau des Hautes Chaumes. Mais il existe une différence entre connaître l'existence d'un phénomène écologique hors contexte et reconnaître son effet structurant et son importance dans un contexte régional complexe donné, en concurrence avec beaucoup d'autres phénomènes.

Ces mêmes confusions, par l'intermédiaire des matrices de succès dont la structure évolue peu avec la diminution de la résolution, permettent d'éprouver la cohérence des différents résultats obtenus pour une même zone aux différentes résolutions. Pegase semble bien reconnaître ces zones comme étant des zones identiques modifiées par ré-échantillonnage des cellules et non par des zones totalement différentes.

Un autre élément, commun à toutes les zones, est l'évolution de la spécificité des différents types d'occupation du sol qui reste sensiblement identique quelle que soit la zone considérée conférant aux graphiques mis en place leur forme en « fer à cheval ». Cette relative homogénéité permet de valider les résultats obtenus avec Pegase pour toutes les zones sélectionnées appartenant à un territoire structurellement homogène.

### 7.2.5 Critiques méthodologiques

Ainsi certains points de notre méthodologie peuvent être critiqués. Parmi ceux-là, nous en avons sélectionné cinq qui, à nos yeux, représentent une limite dans l'analyse des données :

- La précision et la validité des données utilisées : en effet, nous avons utilisé une cartographie de la végétation qui s'est avérée comporter une certaine quantité d'erreurs. Il est certain, comme nous l'avons montré, que ces erreurs ont été prises en compte lors de la procédure. Cela dit, il serait intéressant de voir ce que donnerait l'utilisation de données corrigées de leurs erreurs ;
- Le choix des zones est contestable. Surtout le fait que la zone de plus haut niveau d'étendue soit commune aux zones de niveau I peut amener à

s'interroger sur l'impact de la variation de cette étendue sur les résultats. Notre choix induit que plus cette dernière augmente, plus on tend vers une seule et même zone. Ceci dit, cette dernière se situe au seul endroit des Hautes Chaumes suffisamment haut et large ;

- Ceci implique le troisième point : nous n'avons pas testé notre méthodologie sur un autre terrain d'étude. En effet, appliquer ces traitements sur un territoire alternatif, avec éventuellement des étendues plus importantes, une structure différente, soumis à des contraintes variées serait un plus dont nous ne pourrions pas faire l'économie ;
- En ce qui concerne le reclassement des variables explicatives, la réflexion qui nous a menés jusqu'au choix des intervalles nous semble incomplète. Nous n'avons pas réellement testé l'influence que pourraient avoir des variations de ces derniers. Par exemple, les courbures ont été reclassées de manière la plus simple qu'il soit, faisant apparaître les zones à courbures négatives, positives et nulles. Mais d'autres stratégies auraient pu être utilisées. Il en va de même pour les tranches de distances par rapport aux structures « fixes » telles les crêtes ou les talwegs. Ce point-là mériterait donc lui aussi une plus mûre réflexion.



## Chapitre 8 : Conclusion et perspectives

### 8.1 Conclusion

Le concept de paysage peut se voir attribuer un certain nombre de définitions en fonction de l'approche selon laquelle il est abordé. Il est important, dès le départ, de déterminer l'approche à adopter en fonction de ses prérogatives de manière mettre en place la réflexion qui conduira aux hypothèses, aux objectifs, à la méthodologie. Notre travail de réflexion nous a amenés à opter pour une approche écologique du paysage en fonction de notre objectif principal qui était de déterminer l'influence de variables physiques et anthropiques sur l'organisation d'un paysage de moyenne montagne.

À partir de cette définition, une sélection des facteurs physiques et anthropiques caractéristiques du territoire étudié nécessite une bonne connaissance de ce dernier. Nous avons montré qu'il existait un nombre important de variables susceptibles d'être prises en compte. Il ne reste alors plus qu'à estimer l'influence de chacune sur le paysage. Notre travail a consisté en la proposition d'une méthodologie permettant de mener à bien cette analyse.

Notre choix s'est porté sur le logiciel Pegase développé par Michel Phipps permettant, entre autres, de mesurer l'action de chaque variable explicative (nos variables physiques et anthropiques), sur la distribution d'une variable cible (la végétation). Mais nous nous sommes appropriés l'outil dans une démarche multiéchelle, ce qui constitue une première. Les résultats obtenus confirment un certain nombre de points théoriques déjà connus, mais font, par ailleurs, apparaître quelques compléments.

En effet, la littérature expose la notion d'échelle comme une notion fondamentale dans toute étude du paysage. Ce fait est bien illustré dans notre travail, puisque nous montrons que l'étude d'un paysage ne peut être menée qu'à une seule échelle sous peine de négliger un certain nombre de variables. Ainsi, même si l'importance de cette notion a été déjà démontrée, nous en apportons une confirmation supplémentaire par l'intermédiaire de l'utilisation du processus Pégase .

D'autre part, nous avons mis en lumière l'existence d'un certain nombre de variables, parmi celles sélectionnées au départ, qui jouent un rôle primordial dans la structuration d'un paysage. Nous les avons appelées « variables dominantes » car leur seule utilisation permet d'expliquer l'organisation du paysage autant que l'utilisation de toutes les variables réunies. Ces variables dominantes sont celles qui vont contribuer à l'organisation du paysage à de nombreuses échelles (résolution et étendue).

Nous avons ainsi montré qu'il donc était possible de cerner rapidement un certain nombre de variables qui structurent un paysage, un territoire. L'utilisation de Pegase permet également de mettre en évidence et de quantifier des mécanismes dynamiques tels que, dans notre cas, la recolonisation forestière.

Au logiciel Pegase, nous avons associé deux outils que nous avons développés, qui tous trois réunis forment un pôle intégrant notre méthodologie dans un contexte S.I.G. et lui permettant d'être utilisé à la fois par des gestionnaires ou des scientifiques. Ces derniers peuvent utiliser notre méthode comme première analyse afin d'émettre un diagnostic sur un terrain peu connu permettant de repérer certains mécanismes inhérents au terrain d'étude. Mais elle peut également être envisagée comme une analyse supplémentaire participant à une confirmation ou à une meilleure connaissance de mécanismes déjà identifiés.

Quoiqu'il en soit, Pegase se pose ainsi comme un outil du plus grand intérêt et dont la puissance pourrait intéresser nombre d'acteurs de différents domaines, mais il est encore, malheureusement, bien méconnu. Quelques améliorations permettraient très certainement de le faire connaître et de généraliser son utilisation.

## 8.2 Perspectives

### 8.2.1 Diversité des applications

L'utilisation de notre méthodologie permet donc de cerner un certain nombre de contraintes s'exerçant sur un paysage, un territoire. Elle peut être mise en œuvre à partir de données disponibles ou facilement produites. Divers types d'utilisateurs pourraient donc lui trouver de l'intérêt, que ce soient des gestionnaires, des scientifiques. D'autant plus que

l'analyse paysagère n'est que la partie apparente des potentialités de Pegase. Il est en effet tout à fait envisageable de l'utiliser dans le cadre d'autres types de problématiques : géographie urbaine (par exemple, l'étude de la distribution de l'habitat en fonction de divers facteurs), la gestion des risques (nous avons par exemple entamé une réflexion sur l'analyse de la localisation des dégâts de la tempête de 1999 dans le Massif central). Plus généralement, elle est applicable à tout phénomène spatialisé soumis à des contraintes.

### 8.2.2 Faciliter l'utilisation de Pegase pour en développer l'utilisation

Dans l'état actuel des choses, mettre en place une analyse utilisant une méta-base de données est une tâche complexe. Un certain nombre d'améliorations sont donc envisageables et concernent autant Pegase que les outils que nous avons développés.

Asc2Peg et XLPeg sont deux outils distincts réalisant chacun une partie d'une même tâche qui est la mise en place de bases de données Pegase. La fusion de ces deux outils au sein d'un seul et même programme serait une source de confort.

Pegase, quant à lui, pourrait bénéficier d'un certain nombre d'améliorations :

- Nos dernières bases de données (et notamment la dernière base Hautes Chaumes en date (base HC) nous a fait apparaître que Pegase pouvait ne pas accepter en même temps un grand nombre de cellules et de variables. D'autre part, les nombres trop importants de classes pour une variable sont sources de dysfonctionnement. De plus, de trop grandes bases de données empêchent l'utilisation de l'AFC incluse dans Pegase ;
- Comme nous l'avons indiqué plus haut, il serait intéressant de pouvoir exporter au format raster les cartographies des états actuel et potentiel de manière à intégrer pleinement Pegase dans un contexte S.I.G. ;
- Il serait intéressant de réorganiser le fichier de sortie .pgl de manière à ce que son importation dans un tableur de type Open Office ou Excel soit optimisée et ne nécessite aucune réorganisation.

Plus généralement, un gain de temps non négligeable découlerait de la fusion de ces trois outils... et mieux encore de leur transformation en un module ou en une extension d'un logiciel S.I.G. de type Grass ou ArcGis.

### 8.2.3 Utiliser Pegase en télédétection ?

Au vu des résultats précédemment obtenus, notamment ceux concernant la mise en évidence de confusions au sein des classes de la cartographie de la végétation, nous nous sommes interrogés sur les potentialités d'une utilisation de l'algorithme dans le cadre de travaux en télédétection.

#### 8.2.3.1 Rappel de quelques principes de la classification par télédétection

La mise en place d'une cartographie par télédétection à partir d'une image satellite nécessite la succession d'un certain nombre d'étapes :

- Préparation des données (mise en place de la composition colorée, corrections géométriques et radiométriques, amélioration des contrastes) ;
- Classification (supervisée ou non) ;
- Interprétation et traitements post-classification.

La phase de classification reste une étape délicate quelle que soit la méthode choisie. L'objet de ce chapitre n'étant pas de formaliser toutes les méthodes existantes, nous resterons concis. Il existe deux grands types de classifications :

- les classifications automatiques : dans ce cas, c'est un algorithme qui analyse de manière automatique l'ensemble des signatures spectrales de tous les pixels de l'image et le regroupe en fonction de ces dernières, mettant ainsi en évidence des groupements naturels. Il est possible d'intervenir en imposant, par exemple, un nombre fini de catégories obtenues en fin de classification ou en imposant certaines classes. Les algorithmes de classification procèdent en général par plusieurs passages au cours desquels les solutions proposées sont affinées de manière à créer des groupes plus homogènes et mieux différenciés ;

- Les classifications supervisées. Il existe plusieurs aspects au niveau de ce type de classification. Nous exposons ci-dessous les principales méthodes :
  - Tout d'abord, on peut identifier une catégorie d'objets en effectuant un simple seuillage des valeurs numériques, dans une bande spectrale qui leur est propre. On parle alors de seuillage monospectral. Par exemple, on identifie facilement les surfaces en eau dans le proche infrarouge. D'autres types de couvert végétal répondent seulement pour des fourchettes de valeurs ,
  - On peut également appliquer simultanément ce type de seuillage dans chacune des bandes spectrales. On parle alors seuillage multispectral ,
  - On note aussi l'existence de la classification par distance minimale où on définit les propriétés de la règle de décision sur base des caractéristiques spectrales de zones/échantillons choisies pour être représentatives des différentes classes d'objet.
  - La classification par maximum de vraisemblance utilise également des zones-échantillons pour déterminer les caractéristiques des classes d'objets. Mais elle fait appel à des méthodes probabilistes. L'algorithme calcule la probabilité de chaque pixel de l'image d'appartenir à telle ou telle classe à partir des sites témoins définis sur l'image courante. La totalité de l'image est ensuite classée sur la base de ces statistiques.

Mais ces types de classifications ont leurs limites. Par exemple, une forêt de feuillus peut présenter une signature légèrement différente en fonction de l'exposition du versant sur lequel elle se trouve. Une route et un toit goudronné vont présenter la même signature. De plus l'hétérogénéité spectrale va résulter des variations du taux de recouvrement des végétaux, de la présence ou non de sols nus, de l'état de croissance de différentes espèces végétales en fonction de la date d'enregistrement, de déficits hydriques éventuels...

L'œil de l'interprète est lui même un capteur de signatures spectrales (de couleurs), mais surtout, il perçoit les formes et connaît les fonctions de l'objet. Une interprétation visuelle est donc nécessaire sur l'image satellite elle-même, mais aussi avec l'aide de

photographies aériennes et surtout par l'intermédiaire de validation sur le terrain. La mise en place d'une cartographie par télédétection reste donc assez fastidieuse et complexe et, pour être efficace, elle doit être menée par des interprètes expérimentés.

### 8.2.3.2 Utilisation de Pegase en télédétection

La carte de la végétation que nous avons utilisée dans nos traitements est elle-même issue de ce type de classification. Au vu des confusions entre les classes d'occupation du sol soulevées par l'algorithme Pegase et vérifiées *a posteriori*, il semble intéressant d'envisager ce dernier comme outil de validation ou, tout du moins, d'aide à la mise en place de ce type de cartographie. En effet, si les classifications supervisées ou non mettent en jeu la notion de « signature spectrale », nous pouvons lui opposer celle de « signature éco-paysagique ». Cette dernière serait basée sur la « spécificité des niches paysagiques » mises à jour par Pegase. Ces niches paysagiques permettent de caractériser les relations existant entre une classe d'occupation du sol avec les variables explicatives qui ont été introduites dans le modèle. Autrement dit, il s'agit de la combinaison de variables explicatives le plus fréquemment associées à une classe de la variable cible. Ainsi, la spécificité de ces niches indique dans quelle mesure la présence d'une classe exclut celle d'une autre.

Les règles qui servent à identifier ces combinaisons peuvent être utilisées pour mettre en place une cartographie de l'« état prédit », c'est à dire une cartographie de l'occupation du sol telle qu'elle serait si on appliquait à chaque combinaison la classe qui lui est associée par l'algorithme.

Dans le cas théorique où l'algorithme cerne parfaitement l'organisation du système, les deux cartes sont parfaitement identiques. Ce n'est jamais le cas, mais une correspondance entre les cartographies des états observé et prédit est le signe d'une traduction satisfaisante des phénomènes organisant les systèmes. Dans le cas contraire, trois hypothèses peuvent être avancées :

- L'algorithme a mal rempli son rôle ;
- Les données relatives aux variables explicatives sont erronées ou insuffisantes ;

- Les données relatives à la variable cible sont erronées.

D'emblée, nous écarterons la première hypothèse du fait du formalisme mathématique de l'algorithme et parce qu'il a déjà été éprouvé dans de nombreuses études. En revanche, il est certain que les deux autres hypothèses doivent impérativement être maintenues. De plus, nous considérons, dans le contexte où nous envisageons d'utiliser l'algorithme, qu'il est indispensable de s'assurer un ensemble optimisé de variables explicatives. Il ne nous reste donc que la dernière hypothèse qui, si l'on part d'une cartographie issue de la télédétection, nous amène à la question suivante : « Notre classification de l'occupation du sol est-elle valide ? »

Il est possible d'imaginer qu'en arrivant à sélectionner un certain nombre de variables participant fortement à la structuration d'un territoire, le résultat de chaque étape du processus de télédétection pourrait être soumis à une analyse Pegase. Le but d'un tel travail ne serait bien sûr pas une validation au sens strict du terme. Il s'agirait plutôt de mettre le doigt, par l'analyse des confusions, sur d'éventuelles erreurs d'interprétation et d'affiner le résultat obtenu.

Il faut ne pas perdre de vue qu'en télédétection on cherche à déterminer des couverts végétaux (ou autres) à partir de diverses mesures optiques faites sur des échantillons sélectionnés des couverts eux-mêmes. Cette prédiction vise donc à déterminer la nature d'objets en utilisant des caractéristiques propres à ces objets. Or, dans le cas de Pegase, on cherche à identifier des couvertures du sol à partir de caractéristiques environnementales des sites où se trouvent ces types de couvertures (altitude, sols, exposition, etc.). Ces prédictors sont donc des propriétés spatialement associées aux types de couverture et non propres à ces types. De la même manière, des regroupements de types de couverture sur des critères strictement physiologiques pourraient parfois ne pas s'avérer pertinents dans la mesure où ils associent des types qui n'ont pas nécessairement la même niche paysagique.

Ainsi, si un type d'occupation du sol donné possède une signature spectrale qui lui est propre (dépendant de ses propriétés optiques (absorptance et réflectance) liées à sa structure) quel que soit le terrain d'étude choisi, sa signature éco-paysagique, elle, sera

dépendante de l'espace considéré et de ses conditions écologiques, topographiques et anthropiques.

Utiliser Pegase dans cet objectif nécessite au préalable une connaissance du terrain d'étude afin de déterminer les facteurs prédictifs à fournir au logiciel. Cette sélection peut être affinée par l'intermédiaire de différents tests dans Pegase. Ensuite, il faut disposer d'une première cartographie réalisée à l'aide d'une méthode de classification par télédétection.

Ces différents éléments vont permettre la mise en place d'une base de données Pegase et son traitement par l'algorithme.

Parmi les divers éléments fournis, plusieurs sont exploitables :

- La néguentropie va bien sûr permettre d'estimer la part de l'organisation du système soulevé par Pegase. Une valeur importante est gage de validité ;
- Une comparaison des cartographies « État actuel » / « État prédit » ;
- L'étude de la matrice de succès.

Pour faciliter la compréhension de notre démarche, nous avons utilisé les résultats obtenus avec la base de données incluant les 16 variables dominantes sélectionnées précédemment (base de données « HC2 »).

Ces résultats ont déjà été présentés dans le chapitre 6.5.1. La redondance est de 56,4% ce qui correspond à un score honorable. L'organisation du système a été dévoilée à 56,4%.

L'étude de la cartographie de l'état actuel comparée à celle de l'état prédit permet de montrer une très forte correspondance confirmant que l'algorithme a plutôt bien cerné l'organisation du système (figure 119)

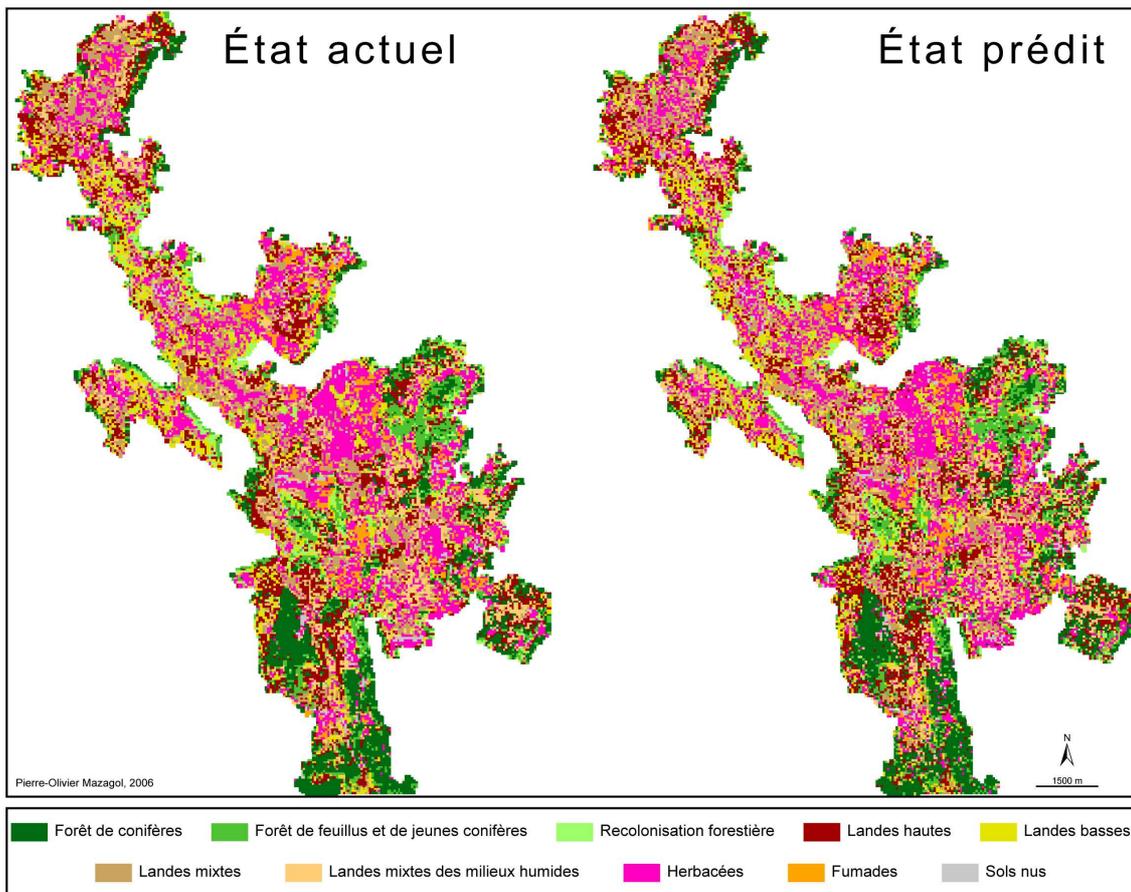


Figure 119 : Comparaison de la carte de la végétation avec l'état prédit par Pegase

Ces cartographies sont en fait difficilement exploitables du fait de l'impossibilité d'exporter, depuis Pegase, la cartographie de l'état prédit au format ascii. Ceci nous permettrait d'obtenir un fichier grid respectant le géoréférencement des cellules et surtout la résolution de la cartographie. Les données nécessaires à une telle exportation ne sont, pour l'instant, pas disponibles dans le fichier de sortie Pegase.

Cependant, il existe une autre méthode au demeurant peu satisfaisante mais permettant tout de même une première étude succincte.

Il s'agit de réaliser une copie d'écran au format tiff, de l'importer dans logiciel SIG et de la géoréférencer manuellement. Sa conversion au format grid permet par la suite d'utiliser les données ainsi obtenues au sein d'une base de données SIG. Cependant, cette solution s'avère peu satisfaisante du fait de la résolution de départ de l'image obtenue lors de la copie d'écran, ce dernier affichant des pixels toujours en 72 ppp (pixels par pouce).

La deuxième limite de cette opération se situe dans le recalage des images obtenues lors de la capture d'écran, source d'imprécision. En effet, des points de repère sont difficiles à mettre en évidence.

De manière à mieux cerner les difficultés, nous avons sélectionné la zone 2 afin de présenter les résultats (figure 120).

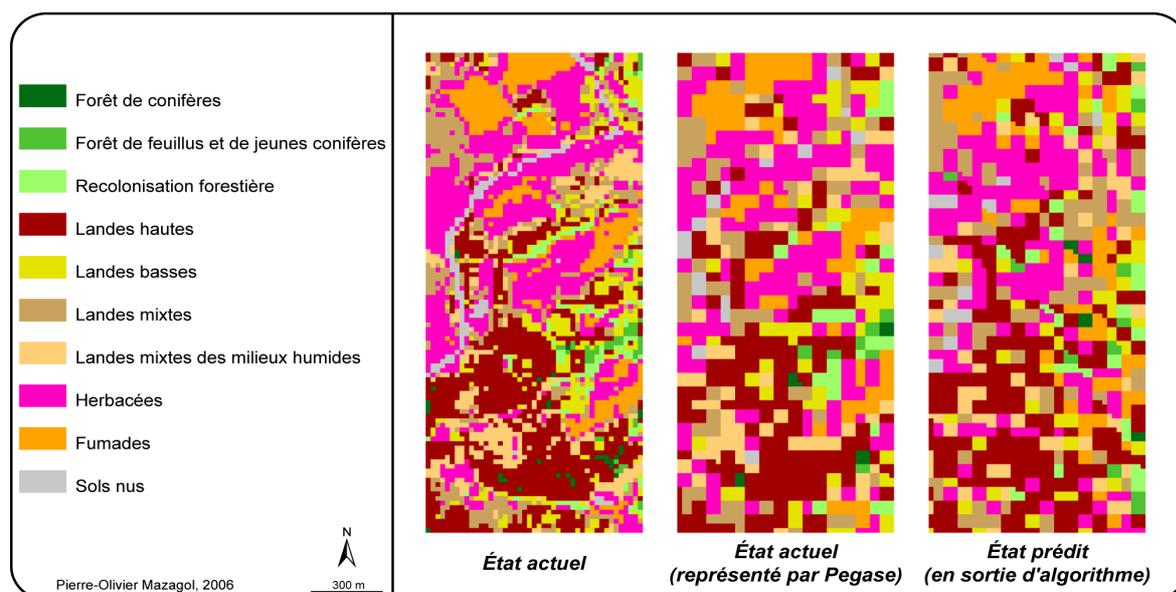


Figure 120 : Comparaison des états actuels et prédit

Ainsi, une simple comparaison entre les cartographies de l'état actuel permet d'immédiatement de mettre l'accent sur la perte d'information liée à la méthode de capture de celles fournies par Pegase. Ensuite, la difficulté de recalage semble être la cause d'un léger décalage. Enfin, on note bien, par exemple le classement automatique des routes en sol nu.

L'utilisation de ces cartographies ne semblent donc, dans l'état actuel des choses, ne pas avoir beaucoup de sens. En revanche, l'utilisation de la matrice de succès semble être un outil très intéressant (figure 121). En effet, à travers l'étude des confusions soulevées par l'algorithme entre distributions de l'état actuel et de l'état prédit, elle permet de soulever des interrogations quant à la légitimité du résultat et/ou des données initiales –

en l'occurrence, de la classification automatique. Sur l'ensemble du terrain d'étude, un certain nombre de confusions ont été repérées en fin de procédure.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V1	65	12		11						
V2	18	48		12						
V3		11	33		18			12		
V4				49	10		10			
V5				17	40	12				
V6				10		48		19		
V7				19		14	38	12		
V8						14		58		
V9								34	48	
V10								33		39

V1 : Conifères  
 V2 : Feuillus et jeunes conifères  
 V3 : Recolonisation forestière  
 V4 : Landes hautes  
 V5 : Landes basses  
 V6 : Landes mixtes  
 V7 : Landes mixtes des milieux humides  
 V8 : Herbacées  
 V9 : Fumades  
 V10 : Sols nus

*Figure 121 : Matrice de succès après application de l'algorithme sur la zone 2 (résolution 20m)*

Ces confusions ont cours entre :

- les « conifères », les « feuillus et jeunes conifères » et les « landes hautes » ;
- la « recolonisation forestière », les « feuillus et jeunes conifères », les « herbacées » et surtout les « landes basses » ;
- les différents types de « landes » entre eux et avec les « herbacées » ;
- les « fumades » et les « herbacées » ;
- les « sols nus » et les « herbacées ».

Toutes ces confusions ne sont évidemment pas systématiques, mais ont été observées, ponctuellement ou plus généralement, par superposition entre la cartographie de l'occupation du sol et les photographies aériennes correspondantes (figure 122).

Nous présentons ci-dessous, un exemple caractéristique regroupant certaines de ces confusions.

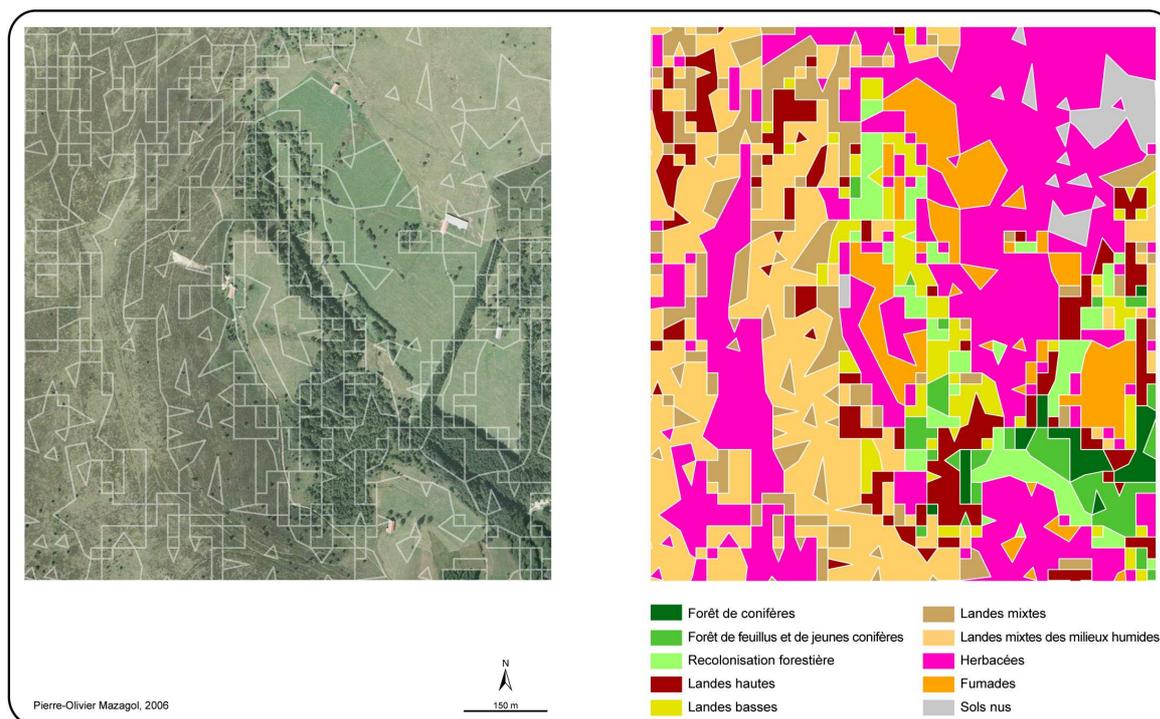


Figure 122 : Comparaison entre la carte de la végétation et la photographie aérienne sur une zone des Hautes Chaumes

Par exemple, on note ici un certain nombre d'imprécisions caractéristiques de l'ensemble de la classification. Ces dernières sont flagrantes concernant :

- les « fumades » qui ne sont pas classées dans leur intégralité ;
- la confusion entre « landes hautes » et « forêts » ;
- la détection de « sol nus » là où il y a en fait des herbacées.

Bien sûr cette comparaison est discutable. Les dates d'acquisition de l'image satellite (1998) et de la photographie aérienne (1999) sont différentes. Ainsi, si cette différence de dates ne peut expliquer de grosses mutations, elle peut justifier l'existence de variations locales, telles que la substitutions de « sols nus » par les « herbacées ».

Cette piste d'une utilisation de Pegase semble devoir être explorée de manière beaucoup plus poussée. D'ores et déjà, il peut être intéressant de réaliser une analyse Pegase susceptible de mettre en évidence un certain nombre de confusions. En revanche, il est illusoire, à l'heure actuelle, de vouloir utiliser la cartographie de l'« état prédit » de la végétation. Bien évidemment, cela ne reste qu'une hypothèse et entreprendre sa validation serait un travail de longue haleine. Mais pour pouvoir creuser dans cette direction,

certaines améliorations de Pegase seront nécessaires et notamment la possibilité d'exporter la cartographie de l'état prédit sous forme raster.

#### 8.2.4 Pegase et l'approche multiéchelle

Enfin, les travaux montrant la nécessité de prendre en compte diverses échelles dans les démarches d'analyse et/ou de gestion se sont multipliés. Ils concernent aussi bien la biodiversité (Lindenmayer *et al.* 2006), que les paysages (Suárez-Seoane et Baudry 2002), les territoires (Fotsing *et al.* 2003), les risques (Tolle 2005), les milieux urbains (Mathis 2003)...

Dans chacune de ces thématiques, les phénomènes aux diverses échelles et leurs portées sur le territoire se doivent d'être parfaitement maîtrisés. Une réflexion multiéchelle est la démarche la plus efficace en termes de stratégie d'analyse, de gestion ou de développement territorial. Cet impératif conduit à chercher la complémentarité des informations à ces différentes échelles au sein de systèmes d'information géographique.

L'utilisation de Pegase dans ces différentes problématiques, avec une approche multiéchelle, telle que celle que nous avons développée, présenterait ainsi un intérêt indéniable.



## Bibliographie

### Paysage et écologie du paysage

**Allen T.F.H., Hoekstra T.W.** (1992). *Toward a Unified Ecology*. Columbia University Press, New York. 384 p.

**Allen T.F.H., Star T.B.** (1982). *Hierarchy : perspectives for ecological complexity*. The University of Chicago Press, Chicago. 310 p.

**Barrué-Pastor M., Blanc-Pamard C., Deffontaines J. P.** (1992). Le paradoxe du paysage. In **Jollivet M** (Eds) *Sciences de la Nature, Sciences de la Société. Les Passeurs de frontière*. CNRS Editions. 297-306.

**Baudry J.** (1988). Approches écologiques des paysages. *Le Courrier de l'Environnement*. 4 : 15-17.

**Baudry J.** (1992). Approche spatiale des phénomènes écologiques : détection des effets d'échelles. In **Auger P., Baudry J., Fournier F.** (Eds) *Hiérarchies et échelles en écologie*. Naturalia Publications, Turriers. 157-171.

**Baudry J., Laurent C.** (1993). Paysages ruraux et activités agricoles. *Le Courrier de l'Environnement*. 20 : 5-10.

**Baudry J., Burel F.** (1985). Système écologique, espace et théorie de l'information. In **Berdoulay V., Phipps M.** (Eds) *Paysage et système*. Éditions de l'Université d'Ottawa. 87-102.

**Béringuier P., Dérioz P. et Laques A.-É.** (1999). *Les paysages français*. Armand Colin, Paris. 95 p.

**Berque A.** (1991). *Médiance, de milieux en paysage*. GIP-Reclus, Montpellier. 159 p.

**Berque A.** (1994). Introduction. In **Berque A.** (Eds) *Cinq propositions pour une théorie du paysage*. Champ Vallon, Seussel. 124 p.

**Bertrand G.** (1968). Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue géographique des Pyrénées et du sud-ouest*. 39 ; 3 : 249-271.

**Bertrand G.** (1978). Le paysage entre Nature et Société. *Revue géographique des Pyrénées et du sud-ouest*. 49 : 239-258.

**Bertrand G.** (1992). L'irruption du sensible dans les politiques d'environnement et d'aménagement. *Le paysage : patrimoine et enjeu de développement, Actes du colloque*

organisé à l'Assemblée nationale par la Commission de la production et des échanges. Assemblée nationale, Paris.

**Blandin P., Lamotte M.** (1988). Recherche d'une entité écologique correspondant à l'étude des paysages : la notion d'écomplexe. *Bulletin d'écologie*. 19 ; 4 : 545-555.

**Bradshaw G.A., Spies T.A.** (1992). Characterizing canopy gap structure in forest using wavelet analysis. *Journal of ecology*. 80 : 205-215.

**Burel F., Baudry J.,** (2000). *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Tec & Doc, Paris. 356 p.

**Delpoux M.** (1972). La science du paysage, une science diagonale. *Revue géographique des Pyrénées et du sud-ouest*. 4 ; 2 : 127-134.

**Ducruc J.P.** (1985). Le système écologique : un niveau privilégié du paysage. In **Berdoulay V., Phipps M.** (Eds) *Paysage et système*. Éditions de l'Université d'Ottawa. 23-32.

**Duhamel R., Quéré J.P., Delattre P., Giraudoux P.** (2000). Landscape effects on the population dynamics of the fossorial form of the water vole (*Arvicola terrestris sherman*). *Landscape Ecology*. 15 : 89-98.

**Ernoul A., Bureau F., Poudevigne I.** (2003). Patterns of organisation in changing landscapes : implications for the management of biodiversity. *Landscape Ecology*. 18 ; 3 : 239-251.

**Farina A.** (1998). *Principles and methods in landscape ecology*. Chapman and Hall, Cambridge. 235 p.

**Forman R.T.T.** (1995a). Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape ecology*. 10 ; 3 : 133-142.

**Forman R.T.T.** (1995b). *Land mosaics : the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press. 632 p.

**Forman R.T.T. Godron M.** (1986). *Landscape Ecology*. John Wiley and sons, New York. 640 p.

**Fotsing E., Cheylan J.-P., DeGroot W. T., Verburg P. H.,** (2003). Un dispositif régional et multi-échelle d'analyse des dynamiques agraires en zone des savanes de l'extrême nord du Cameroun. *6èmes Rencontres de Théo Quant : Nouvelles approches en géographie théorique et quantitative*. Université de Franche-Comté, Besançon.

**Green B.H., Simmons E.A., Woltjer I.** (1996). Landscape conservation. Some steps toward developing a new conservation dimension. A draft report of the IUCN-CESP landscape Working Group. Department of Agriculture, Horticulture and Environment, Wye College, Ashford, Kent, UK.

**Haber W.** (2004). Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology. *Ecological Research*. 19 : 99-106.

- Hansson L.** (1977). Landscape ecology and stability of populations. *Landscape and Planning*. 4 : 85-93.
- Harper K.A., MacDonald S.E.** (2001). Structure and composition of riparian boreal forest: new methods for analysing edge influence. *Ecology*. 82 : 649-659.
- Hills G. A.** (1974). A philosophical approach to landscape planning. *Landscape planning*. 1 : 339-371.
- Jelinski D., Wu J.** (1996). The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology. *Landscape Ecology*. 11 ; 3 : 129-140.
- Joliveau T.** (1994). La gestion paysagère de l'espace rural : questions, concepts, méthode et outils. *Revue de géographie de Lyon*. 69 ; 4 : 325-334.
- Keitt T.H.** (2000). Spectral representation of neutral landscape. *Landscape Ecology*. 15 : 479-493.
- Kie J.G., Bowyer R.T., Nicholson M.C., Boroski B.B., Loft E.R.** (2002). Landscape heterogeneity at differing scales: Effects on spatial distribution of Mule Deer. *Ecology*. 83 ; 2 : 530-544.
- Lindenmayer D.B., Franklin J.F., Fischer J** (2006). General management principles and a checklist of strategies to guide forest biodiversity conservation. *Biological Conservation*. 131 : 433-445.
- Lefeuvre J.C., Barnaud G.,** (1988). Ecologie du paysage : mythe ou réalité ?. *Bulletin d'écologie*. 19 ; 4 : 493-522.
- Liebhold A.M., Gurevitch J.** (2002). Integrating the statistical analysis of spatial data in ecology. *Ecography*. 25 : 553-557.
- Liu J., Taylor W.W.** (2002). *Integrating Landscape Ecology into Natural Resource Management*. Cambridge University Press. 480 p.
- Mathis P.,** (2003). Multi level modelling: networks and cities. *6èmes Rencontres de Théo Quant : Nouvelles approches en géographie théorique et quantitative*. Université de Franche-Comté, Besançon.
- Mimra M.** (1993). Spatial heterogeneity assessment of cultural landscape. Thèse, Czech University of Agriculture, Prague.
- Naveh Z.** (1987). Biocybernetics and thermodynamic perspectives of landscape functions and land use patterns. *Landscape and Urban Planning*. 1 ; 2 : 75-83.
- Neuray G.** (1982). *Des paysages – Pour qui ? Pourquoi ? Comment ?*. Les presses Agronomiques de Gembloux. 589 p.
- Noirfalise A.** (1988). Paysages : l'Europe de la diversité. Commission des Communautés Européenne. EUR 11452. 130 p.

- O'Neill R.V., DeAngelis D.L., Waide J.B., Allen T.F.H.** (1986). *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University Press. 253 p.
- Odum E.P.** (1971). *Fundamentals of Ecology*. W.B. Saunders, Philadelphia. 574 p.
- Phipps M.** (1985). Le système écologique : un niveau privilégié du paysage. In **Berdoulay V., Phipps M.** (Eds) *Paysage et système*. Editions de l'Université d'Ottawa. 59-74.
- Rougerie G.** (1969). *Géographie des paysages*. P.U.F., Que sais-je ?, n° 1362. 112 p.
- Schermann N., Baudry J.** (2002). Analyse descriptive multi-échelle de la structure d'un paysage. Application à la mosaïque d'occupation du sol d'un territoire agricole dans le bocage breton. *Revue internationale de géomatique*. 12 ; 3 , 4 : 18.
- Sklenicka P., Lhota T.,** (2002). Landscape heterogeneity - a quantitative criterion for landscape reconstruction. *Landscape and Urban Planning*. 58 : 147-156.
- Stephenson N. L.** (1990). Climatic controls on vegetation distribution: the role of the water balance. *American Naturalist*. 135 : 649-670.
- Suárez-Seoane S., Baudry J.** (2002). Scale dependence of spatial patterns and cartography on the detection of landscape change: relationships with species' perception. *Ecography*. 25 ; 4 : 499-511.
- Swanson F.J., Kratz T.K., Caine N., Woodmansee R.G.** (1988). Landform effects on ecosystem patterns and processes. *BioScience*. 38 ; 2 : 92-98.
- Tolle F.** (2005). Paysage et risque sanitaire - Le cas de l'échinococcose alvéolaire. Approche multiscalaire. Université de Franche-Comté. 334 p.
- Turner M.G.** (1989). Landscape Ecology : The Effect of Pattern on Process. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 20 : 171-197.
- Turner M.G., O'Neill R.V., Gardner R.H., Milne B.T.** (1989). Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*. 3 : 153-162.
- Turner G. M., Gardner H. R.** (1990). Quantitative methods in Landscape Ecology : an introduction. In **Turner G. M., Gardner H. R.,** (Eds) *Quantitative methods in Landscape Ecology*. Springer, New York. 3-14.
- Veyret Y.** (1999). *Géo-environnement*. SEDES, Paris. 159 p.
- Veyret Y., Lemaître A.,** (1996). Reflexions sur le paysage: paysage et patrimoine historique. Quelques fonctions du paysage. *L'information géographique*. 60 ; 5 : 177-183.
- Whittaker R. H.** (1975). *Communities and ecosystems*. MacMillan, New York. 385 p.
- Wieber J.-C.** (1987). Paysage, image, espace. *Mappemonde*. 4 : 26-27.
- Wiens J.A.** (1989). Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology*. 3 : 385-397.

**With K.A., Gardner R.H., Turner M.G.** (1997). Landscape connectivity and population distribution in heterogeneous environments. *Oikos*. 78 : 151-169.

**Wu J., Jelinski D.E., Luck M., Tueller P.T.** (2000). Multiscale analysis of landscape heterogeneity : scale variance and pattern metrics. *Geographical information sciences*. 6 : 6-19.

**Wu J., Shen W., Sun W., Tueller P.T.** (2002). Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. *Landscape Ecology*. 17 : 761-782.

## Les Hautes Chaumes

**Baulig H.** (1928). Le Plateau Central de la France et sa bordure méditerranéenne : Étude morphologique. Thèse, Paris. 590 p.

**Bessenay C.** (1995). La gestion des données environnementales dans un espace naturel sensible : le Système d'Information Géographique des Hautes-Chaumes foréziennes. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, CRENAM, Université Jean Monnet. 306 p.

**Couhert J.-P.** (1988). Les Hautes-Chaumes des Monts du Forez : bilan de l'utilisation et des perspectives d'aménagement d'un territoire. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, ENITA, Clermont-Ferrand. 200 p.

**Cubizolle H.** (à paraître). La répartition géographique des tourbières : une combinaison de facteurs physiques et humains. *Origines, dynamiques et conservation des tourbières, Actes du colloque de Goutelas, octobre 2005*. Université de Saint-Étienne.

**Cubizolle H.** (2005). Paléoenvironnement et turfigénèse, l'apport de l'étude des tourbières à la connaissance de l'évolution holocène des milieux montagnards du Massif Central oriental granitique. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Limoges. 750 p.

**D'Alverny A.** (1907). Les Hautes-Chaumes du Forez. *Bulletin de la Diana*. 11 : 160-211.

**Damon M.** (1972). Les Jasseries des Monts du Forez. Sociologie de la vie pastorale. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université de Lyon II. 260 p.

**Etlicher B.** (1986). Les massifs du Forez, du Pilat et du Vivarais : régionalisation et dynamique des héritages glaciaires et périglaciaires en moyenne montagne cristalline. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Lyon II. 687 p.

**Etlicher B., Bessenay C., Couhert J.-P., Faury O., Francez A.-J., Suchel J.-B., Thébaud G.** (1993). *Les Hautes Chaumes du Forez : Diagnostic écologique pour la gestion d'un espace sensible*. Publications de l'université de Saint-Etienne. 159 p.

**Jacqueminet C., Etlicher B., Sourp E., Laire R.** (2002). Un système d'information pour la concertation et l'aide à la décision sur un site Natura 2000 dans le Parc naturel régional Livradois Forez. *Géoévénement*. Paris. 8 p.

**Jacqueminet C., Thébaud G.** (2000). Cartographie des formations végétales des Hautes-Chaumes à l'aide des images SPOT. In **Couhert J.-P., Etlicher B., Jacqueminet C., Sourp E., Thébaud G.** (Eds) *Le suivi du milieu des Hautes-Chaumes à l'échelle du massif par télédétection. Rapport annuel de suivi des procédures agri-environnementales en Haut-Forez, P.N.R. du Livradois-Forez.* P.N.R. du Livradois-Forez. 3 p.

**Janssen C.R.** (1990). Histoire de la végétation des Monts du Forez. In **Centre d'Etudes Foréziennes** (Eds) *Les Monts du Forez : le milieu et les hommes.* Université Jean Monnet. 65-79.

**Lajarge R.** (1997). Environnement et processus de territorialisation : le cas du Parc naturel de la Chartreuse (France). *Revue de géographie alpine.* 2 : 131-144.

**Laurens L.** (1995). Parcs naturels, du concept à la pratique d'une agriculture environnementale. *Annales de géographie.* 594 : 339-359.

**Laurens L.** (1997). Les parcs naturels régionaux, une approche patrimoniale de la fragilité et de la gestion paysagère. *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie.* 3 ; 4 : 9-28.

**Porteret J.** (2001). Le rôle des sociétés humaines dans la mise en place et le développement des tourbières du Haut-Forez. Mémoire de Maîtrise, Université Jean Monnet. 181 p.

**Thébaud G.** (1988). Le Haut-Forez et ses milieux naturels. Apport de l'analyse phytosociologique pour la connaissance écologique et géographique d'une moyenne montagne cristalline subalpine. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Clermont-Ferrand II. 330 p.

**Thébaud G.** (1990). La végétation du Haut-Forez. In **Centre d'Etudes Foréziennes** (Eds) *Les Monts du Forez : le milieu et les hommes.* Université Jean Monnet. 37-63.

## MNT et variables associées

**Ansault A.** (1988). Étude et modélisation de formes de la surface terrestre. Thèse, Université Catholique de Louvain, Louvain la Neuve. 312 p.

**Beven K.J., Kirkby M.J.** (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological sciences bulletin.* 29; 1 : 43-69.

**Brown D.G., Lusch D.P., Duda K.A.** (1998). Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data. *Geomorphology.* 21 : 233-250.

**Charleux-Demargne J.** (2001). Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie, Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université de Marne-La-Vallée. 350 p.

**Conrad O.** (2002). DiGeM 2.0.

**Conrad O.** (2004). SAGA 2.0.

**Dymond C.C., Johnson E.A.** (2002). Mapping vegetation spatial patterns from modeled water, temperature and solar radiation gradients. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 57 : 69-85.

**Evans I.S.** (1979). An integrated system of terrain analysis and slope mapping. Final report on grant DA-ERO-591-73-G0040.

**Florinsky I.V.** (1998). Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid. *International Journal of Geographical Information Science*. 12 ; 8 : 829 - 852.

**Florinsky I.V.** (2000). Relationships between topographically expressed zones of flow accumulation and sites of fault intersection : Analysis by means of digital terrain modeling. *Environmental Modelling and Software*. 15 : 87-100.

**Florinsky I.V., Eilers R., Manning G.R., Fuller L.G.** (2002). Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling & Software*. 17 : 295- 11.

**Florinsky I.V. Kuryakova G.** (1996). Influence of topography on some vegetation cover properties. *Catena*. 27 : 123-141.

**Hörsch B.** (2003). Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the central Alps using digital elevation models. *Ecological Modelling*. 168 ; 3 : 267-282.

**Hutchinson M.F.** (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Third International Symposium on Spatial Data Handling*. Sydney.

**Hutchinson M.F.** (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*. 106 : 211-232.

**Hutchinson M.F.** (1993). Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. In **Goodchild M.F., Parks B.O. and Steyaert L.T. (eds)** (Eds) *Environmental modeling with GIS*. Oxford University Press, New York. 392-399.

**Hutchinson M. F., Dowling T. I.** (1991). A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes*. 5 : 45-58.

**Laurini R., Milleret-Raffort F.** (1993). *Les bases de données en géomatique*. Hermès, Paris. 350 p.

**Mitasova H., Hofierka J.** (1993). Interpolation by regularized spline with tension : II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*. 25 : 25.

**Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R.,** (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*. 5 ; 1 : 3-30.

**Reuter H. I., Kersebaum K. C., Wendroth O.** (2005). Modelling of solar radiation influenced by topographic shading - evaluation and application for precision farming. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* 30 : 143-149.

**Shary P. A.** (1995). Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology.* 27 ; 3 : 373-390.

**Skidmore A.K.** (1989). A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems.* 3 ; 4 : 323-334.

**Speight J.G.** (1974). A parametric approach to land form region. *Special publication Institute of British Geographers.* 7 : 213-230.

**Stephenson G.** (1973). *Mathematical methods for science students.* Longman, New York. 544 p.

**Wilson J. P., Gallant J. C.** (2000). *Terrain analysis : principles and applications.* John Wiley and Sons, New York. 512 p.

**Wood J.** (1996). The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models. University of Leicester. 185 p.

**Wood J.** (2004). LandSerf 2.2.

**Zevenbergen L.W., Thorne C.R.** (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms.* 12 : 47-56.

## Pegase

**Benzecri J.P.** (1973). *L'analyse de données. - Tome 1 et 2.* Dunod, Paris. 1260 p.

**Casado M.A., Ramirez-Sanz L., de Miguel J.M., de Pablo C.L.** (1997). An objective method for partitioning dendograms based on entropy parameters. *Plant ecology.* 131 ; 2, 193-197

**Davis F.W., Dozier J.,** (1990). Information analysis of a spatial data base for ecological land classification. *Photogrammetric engineering and remote sensing.* 56 ; 5 : 605-613.

**Dumanski J., Phipps M., Huffman E.** (1987). A study of the relationships between soil survey data and agricultural land use using information theory. *Canadian Journal of Soil Sciences.* 67 : 95-102.

**Graniero P.A., Price J.S.** (1999). The importance of topographic factors on the distribution of bog and heath in a Newfoundland blanket bog complex. *Catena.* 36 : 233- 254.

- Kullback S.** (1959). *Statistics and Information Theory*. John Wiley and Sons, New York. 416 p.
- Lipkovich I., Smith E. P.** (2002). Biplot and Singular Value Decomposition Macros for Excel. *Journal of Statistical Software*. 7 : 1-15.
- Lundström-Gilliéron C.** (1999). Modélisation de la dynamique du paysage : outil d'aide à la décision pour une gestion du territoire tenant compte de la faune. Etude de cas : le lièvre en Suisse. GECOS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 156 p.
- Lundström-Gilliéron C., Schlaepfer R.** (2003). Hare abundance as an indicator for urbanisation and intensification of agriculture in Western Europe. *Ecological Modelling*. 168 ; 3 : 283-301.
- Mazagol P.-O.** (2003). Influence des variables physiographiques sur l'organisation d'un paysage. *14ème Rencontres Régionales de la Recherche, Saint-Etienne*. Région Rhône-Alpes.
- Mazagol P.-O.** (2005). XLPeg : Outil de mise en place d'entêtes de bases de données Pegase. CRENAM.
- Mazagol P.-O., Mayoud R.** (2005). Asc2Peg : outil de construction de bases de données Pegase à partir de fichiers au format d'échange ESRI ASCII Grid. CRENAM.
- Morin C.** (1979). Modèle d'organisation spatiale et écologique des types de communautés végétales de la région du Monts -Ste-Marie. Thèse, Université d'Ottawa.
- Phipps M.** (1981). Entropy and community pattern analysis. *Journal of theoretical biology*. 93 : 253-273.
- Phipps M.** (1995). Paysage écologique, système organisé et analyse de l'information. In **Falardeau J.** (Eds) *Méthodes et réalisation de l'écologie du paysage dans l'aménagement du territoire*. Polysciences Publications, Montréal. 15-24.
- Phipps M.** (2001). Espace, entropie, environnement. *5èmes Rencontres de Théo Quant : Nouvelles approches en géographie théorique et quantitative*. Université de Franche-Comté, Besançon.
- Phipps M.** (2002). PEGASE operation manual.
- Phipps M., Baudry J., Burel F.** (1986a). Ordre topo-écologique dans un paysage rural : les niches paysagiques. *Compte rendus de l'Académie des Sciences de Paris*. 302 ; série III : 691-696.
- Phipps M., Baudry J., Burel F.** (1986b). Dynamiques de l'organisation écologique d'un paysage rural : modalité de la désorganisation dans une zone péri-urbaine. *Compte rendus de l'Académie des Sciences de Paris*. 303 ; série III : 263-268.
- Phipps M., Langlois A., Jiang W.** (1994). Les marqueurs de l'identité ethno-linguistique dans les paysages ruraux: l'Ontario de l'est et le Pontiac (Québec). *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*. 38 : 61-75.



## Tables des cartes

Carte 1 : Localisation du P.N.R. Livradois-Forez.....	28
Carte 2 : Cartographie de la distribution des types de végétation des Hautes Chaumes (Jacqueminet et Thébaud 2000).....	47
Carte 3 : Cartographie de la distribution des altitudes (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	55
Carte 4 : Cartographie des pentes des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 3 cellules par 3).....	58
Carte 5 : Cartographie des expositions des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 3 cellules par 3).....	60
Carte 6 : Cartographie des courbures verticales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9).....	63
Carte 7 : Cartographie des courbures horizontales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9).....	65
Carte 8 : Cartographie des courbures maximales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9).....	67
Carte 9 : Cartographie des courbures minimales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9).....	68
Carte 10 : Cartographie des courbures moyennes des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9).....	69
Carte 11 : Cartographie des courbures longitudinales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9).....	72
Carte 12 : Cartographie des courbures transversales des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 9 cellules par 9).....	73
Carte 13 : Cartographie des zones potentielles d'accumulation, de transit et de dissipation des écoulements (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	76

---

Carte 14 : Cartographie de la distance par rapport à la crête la plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	77
Carte 15 : Cartographie de la distance par rapport au talweg le plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	78
Carte 16 : Cartographie de l'indice d'humidité (Hautes Chaumes des Monts du Forez)....	79
Carte 17 : Cartographie de la quantité potentielle de radiation solaire reçue (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	81
Carte 18 : Cartographie de la durée d'insolation potentielle (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	82
Carte 19 : Cartographie de la rugosité du relief des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 30 cellules par 30).....	83
Carte 20: Cartographie du relief relatif local des Hautes Chaumes des Monts du Forez (évaluées par noyaux de 30 cellules par 30).....	85
Carte 21 : Cartographie des formations superficielles (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	86
Carte 22 : Cartographie de la distance par rapport au cours d'eau le plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	88
Carte 23 : Cartographie de la distance par rapport à la zone humide la plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	89
Carte 24 : Cartographie de la distance par rapport aux tourbières (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	91
Carte 25 : Cartographie de la distance par rapport au chemin le plus proche (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	92
Carte 26 : Cartographie de la distribution des terrains boisés, fauchés et pâturés (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	94
Carte 27 : Distribution des parcelles en fonction du type de pâturage exercé (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	95

Carte 28 : Distribution des parcelles en fonction de leur mode d'utilisation (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	96
Carte 29 : Distribution des parcelles en fonction du type d'utilisation (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	97
Carte 30 : Localisation du secteur de la Roche Gourgon (Hautes Chaumes des Monts du Forez).....	104
Carte 31 : Localisation des 5 zones test de niveau I.....	174



## Tables des figures

Figure 1 : Schématisation de la notion de paysage.....	11
Figure 2 : Illustration du paysage vu comme un système spatial d'unités (cellules) porteuses, réceptrices et productrices d'information (Phipps 1985).....	13
Figure 3 : Les deux composantes de l'hétérogénéité (modifiée d'après Burel et Baudry 2000).....	15
Figure 4 : Échelle : variation de l'étendue et de la résolution (modifiée d'après Burel et Baudry 2000).....	17
Figure 5 : Visualisation en 3 dimensions d'une partie des Hautes Chaumes (réalisée avec SpaceEyes 3D).....	29
Figure 6 : Sous matrice de taille 3 de la matrice des altitudes (Wood 1996).....	52
Figure 7 : Classification des types de surfaces quadratiques.....	54
Figure 8 : Représentation 3D de la notion de pente (modifiée d'après Florinsky).....	56
Figure 9 : Représentation de la notion d'exposition (modifiée d'après Florinsky).....	59
Figure 10 : Représentation 3D de la notion de la courbure verticale (modifiée d'après Florinsky).....	62
Figure 11 : Trois cas de figure pour la courbure verticale (d'après Florinsky).....	62
Figure 12 : Représentation 3D de la notion de courbure horizontale (d'après Florinsky)...	64
Figure 13 : Trois cas de figure pour la courbure horizontale.....	64
Figure 14 : Représentation géométrique des notions de courbures transversale et longitudinale.....	70
Figure 15 : Classification des formes de terrain par les signes des courbures verticale (Cv) et horizontale (Ch) (d'après Florinsky).....	75
Figure 16 : Photographies de la Roche Gourgon et représentation en 3D.....	100

Figure 17: Occupation du sol de la zone Roche Gourgon (résolution 20 m) avec superposition des courbes de niveau.....	107
Figure 18: Occupation du sol de la zone Roche Gourgon (résolution 100 m) avec superposition des courbes de niveau.....	107
Figure 19 : Occupation du sol de la zone Roche Gourgon à différentes résolutions.....	108
Figure 20 : M.N.T. de la zone « Roche Gourgon » à différentes résolutions.....	109
Figure 21 : Effet de la résolution sur la précision du MNT.....	110
Figure 22 : Évolution des altitudes maximale, minimale, moyenne et de son écart type au niveau de la Roche Gourgon.....	111
Figure 23 : Évolution de la distribution des pentes en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon).....	113
Figure 24 : Évolution des pentes maximale, minimale, moyenne et de son écart type au niveau de la Roche Gourgon.....	114
Figure 25 : Évolution de la distribution des pentes en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon).....	115
Figure 26 : Évolution de la distribution des courbures horizontales en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon).....	117
Figure 27 : Évolution de la distribution des courbures verticales en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon).....	118
Figure 28 : Évolution de la distribution des courbures d'accumulation en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon).....	119
Figure 29 : Évolution de la distribution de la rugosité en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon).....	121
Figure 30 : Évolution de la distribution du relief local relatif en fonction de la résolution et de la taille des noyaux (Roche Gourgon) .....	122
Figure 31 : Représentation schématique des différents éléments du système.....	129
Figure 32 : Illustration du paysage vu comme un canal d'information entre l'espace E et l'espace U. Le chevauchement des deux cercles représente la redondance entre les deux	

espaces et l'organisation spatiale écologique du paysage (modifiée d'après Phipps 1985) .....	134
Figure 33 : Représentations schématiques d'autres cas de canaux d'information (modifiée d'après Lundström-Gilliéron 1999).....	135
Figure 34 : Dendrogramme de la division hiérarchique.....	138
Figure 35 : Extrait de la liste des caractéristiques des TSS après traitement de la base de données « exemple ».....	139
Figure 36 : Extrait de la matrice de distribution des classes de la variable cible dans chaque TSS après traitement de la base de données « exemple ».....	142
Figure 37 : Contribution des variables explicatives à la néguentropie après traitement de la base de données « exemple ».....	143
Figure 38 : Représentation par Pegase de la contribution des différentes variables explicatives à la néguentropie.....	144
Figure 39 : Évolution du nombre de TSS, de la néguentropie et de la complexité au cours du processus divisif.....	144
Figure 40: Représentation graphique par Pegase de la chute de l'entropie et de l'augmentation de la complexité en fonction du nombre de TSS.....	145
Figure 41 : Spécificité des classes de la variable cible après traitement de la base de données « exemple ».....	146
Figure 42: Représentation par Pegase de la spécificité de chaque classe de la variable cible .....	147
Figure 43 : Résultats obtenus après traitement de la base de données « exemple ».....	147
Figure 44 : Présentation des résultats dans l'interface graphique de Pegase.....	148
Figure 45 : Chute d'entropie en fonction du nombre de TSS et courbe ajustée.....	148
Figure 46 : Cartographie de la végétation par Pegase dans le cadre de notre exemple.....	150
Figure 47 : Cartographies des états actuel, prédit et potentiel présentées par Pegase dans le cadre de notre exemple.....	151

Figure 48 : Cartographie de l'entropie résiduelle en fin de procédure par Pegase dans le cadre de notre exemple.....	152
Figure 49 : Calcul des tests de succès (extrait de la base de données Hautes Chaumes)...	156
Figure 50 : Structure de l'en-tête d'une base de données Pegase.....	158
Figure 51 : Présentation des informations contenues dans l'en-tête par Pegase.....	159
Figure 52 : Extrait d'un corps de base de données Pegase.....	160
Figure 53 : L'interface graphique d'Asc2Peg.....	165
Figure 54 : Capture de la première feuille de XLPeg.....	166
Figure 55 : Organisation des données dans l'optique de la mise en place d'une base de données Pegase.....	168
Figure 56 : Augmentation de l'étendue à partir de la zone 5.....	175
Figure 57 : Visualisation 3D de la zone 1.....	176
Figure 58 : Visualisation 3D de la zone 2.....	177
Figure 59 : Visualisation 3D de la zone 3.....	178
Figure 60 : Visualisation 3D de la zone 4.....	179
Figure 61 : Visualisation 3D de la zone 5.....	179
Figure 62 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I).....	185
Figure 63 : Évolution de la complexité C en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I).....	186
Figure 64 : Évolution de la contribution de chaque variable en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I).....	187
Figure 65 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I).....	189
Figure 66 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I).....	191

Figure 67 : Évolution des résultats des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I).....	191
Figure 68 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau I) (valeurs indiquées en %).....	193
Figure 69 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau I).....	195
Figure 70 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II).....	196
Figure 71 : Évolution de la complexité C en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II).....	197
Figure 72 : Évolution de la contribution de chaque variable en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II).....	198
Figure 73 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II).....	199
Figure 74 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II).....	200
Figure 75 : Évolution du résultat des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II).....	201
Figure 76 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau II) (valeurs indiquées en %).....	202
Figure 77 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau II).....	203
Figure 78 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III).....	205
Figure 79 : Évolution de la complexité C en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III).....	205
Figure 80 : Évolution de la contribution de chaque variable en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III).....	207

Figure 81 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III).....	208
Figure 82 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III).....	209
Figure 83 : Évolution du résultat des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III).....	209
Figure 84 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau III) (valeurs indiquées en %).....	211
Figure 85 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau III).....	212
Figure 86 : Évolution de la redondance et du nombre de cellules en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV).....	213
Figure 87 : Évolution de la complexité C en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV).....	214
Figure 88 : Évolution de la contribution de chaque variable en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV).....	215
Figure 89 : Évolution de la spécificité de chaque type d'occupation du sol en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV).....	216
Figure 90 : Évolution des résultats des tests primaires et secondaires globaux en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV).....	217
Figure 91 : Évolution du résultat des tests secondaires en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV).....	217
Figure 92 : Évolution de la matrice de succès en fonction de la résolution (zone 3 de niveau IV) (valeurs indiquées en %).....	219
Figure 93 : Évolution du résultat graphique de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau IV).....	220
Figure 94 : Évolution de la redondance en fonction de la résolution aux différentes étendues considérées (zone 3).....	222

Figure 95 : Évolution de la complexité en fonction de la résolution aux différentes étendues considérées.....	223
Figure 96 : Variables contribuable aux différentes résolutions et étendues (zone 3).....	225
Figure 97 : Évolution de la spécificité des types d'occupation du sol en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3).....	227
Figure 98 : Évolution du pourcentage de test de succès primaires en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3).....	228
Figure 99 : Évolution du pourcentage du test de succès secondaire global en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3).....	229
Figure 100 : Évolution du pourcentage de succès secondaires en fonction de la résolution aux différentes étendues (zone 3).....	230
Figure 101 : Évolution de la redondance et de la complexité en fonction de l'étendue pour chaque zone 3, 4 et 5.....	231
Figure 102 : Évolution de la spécificité de chaque classe de végétation en fonction de l'étendue pour chaque zone 3, 4 et 5.....	232
Figure 103 : Évolution de la redondance et de la redondance ajustée en fonction de la résolution , pour chaque zone et à chaque étendue.....	234
Figure 104 : Évolution de la spécificité des types de végétation en fonction de la résolution, pour chaque zone et à chaque étendue.....	236
Figure 105 : Bilan des contributions des variables explicatives, pour les zones 1, 2 et 3, à chaque étendue.....	237
Figure 106 : Bilan des contributions des variables explicatives, pour les zones 4 et 5, à chaque étendue.....	238
Figure 107 : Bilan des contributions des variables explicatives dominantes, pour chaque zone et à chaque étendue.....	239
Figure 108 : Les variables explicatives dominantes et leur niveau d'étendue de prédilection.....	240
Figure 109 : Diminution de l'entropie et augmentation de la complexité.....	242

Figure 110 : Contributions des différentes variables explicatives à la néguentropie (territoires des Hautes Chaumes à la résolution 20m).....	244
Figure 111 : Spécificités des différentes classes de la variable cible (territoires des Hautes Chaumes à la résolution 20m).....	245
Figure 112: Matrice de succès (Base HC 1, Hautes Chaumes, résolution 20m).....	246
Figure 113: Matrice de succès (Base HC 2, Hautes Chaumes, résolution 20m).....	246
Figure 114: Matrice de succès (Base HC 3, Hautes Chaumes, résolution 20m).....	246
Figure 115 : Matrice de succès après regroupement (Base HC 1, Hautes Chaumes, résolution 20m).....	247
Figure 116 : Matrice de succès après regroupement (Base HC 2, Hautes Chaumes, résolution 20m).....	247
Figure 117 : Matrice de succès après regroupement (Base HC 3, Hautes Chaumes, résolution 20m).....	247
Figure 118 : Résultats des tests de succès pour les bases HC 1, 2 et 3 Hautes Chaumes, résolution 20m.....	248
Figure 119 : Comparaison de la carte de la végétation avec l'état prédit par Pegase.....	273
Figure 120 : Comparaison des états actuels et prédit.....	274
Figure 121 : Matrice de succès après application de l'algorithme sur la zone 2 (résolution 20m).....	275
Figure 122 : Comparaison entre la carte de la végétation et la photographie aérienne sur une zone des Hautes Chaumes.....	276

## Listes des tableaux

Tableau 1 : Les cinq paramètres morphologiques, dérivées de l'équation de la surface.....	54
Tableau 2 : Récapitulatif des options choisies pour l'interpolation du MNT « Roche Gourgon » avec la fonction « Topo to raster ».....	103
Tableau 3: Tableau des fréquences des TSS par classe de la variable cible $V_j$ .....	141
Tableau 4 : Tableau des fréquences des TSS par classe de la variable cible réduit aux deux états $C^{*+}$ et $C^{*-}$ .....	145
Tableau 5 : Organisation générale de la matrice 1 des tests de succès correspondant au tableau des fréquences des TSS par classes de la variable cible (tableau 3).....	155
Tableau 6 : Organisation générale de la matrice 2.....	156
Tableau 7 : Organisation générale de la matrice 3.....	157
Tableau 8 : stratégie de reclassement des variables.....	181
Tableau 9 : Rappel du codage des types d'occupation du sol au sein des bases de données Pegase et des regroupements a priori en vue de l'application des tests de succès.....	182
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des variables dont la contribution est significative (zone 3 de niveau I).....	187
Tableau 11 : inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau I).....	194
Tableau 12 : Tableau récapitulatif des variables dont la contribution est significative (zone 3 de niveau II).....	198
Tableau 13 : inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau II).....	204
Tableau 14 : Tableau récapitulatif des variables dont la contribution est significative (zone 3 de niveau III).....	207
Tableau 15 : Inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau III).....	213

---

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des variables dont la contribution est significative (zone 3 de niveau IV).....	215
Tableau 17 : Inerties des axes factoriels de l'analyse des correspondances (zone 3 de niveau IV).....	221
Tableau 18 : Niveau de prédilection des variables « dominantes » en fonction de l'étendue .....	224
Tableau 19 : Résultats de la procédure divisive (pour l'ensemble du territoire des Hautes Chaumes à la résolution 20m) (les valeurs ajustées sont reportées entre parenthèses).....	242