

Mise en évidence de « variables dominantes » dans l'organisation du paysage : approche multi-échelle

Pierre-Olivier Mazagol

UMR 5600 CRENAM, CNRS/Université Jean Monnet
6 rue Basse-des-Rives – 42023 Saint-Étienne Cedex 02, France
pierre.olivier.mazagol@univ-st-etienne.fr

MOTS - CLÉS

Paysage
Entropie spatiale
Organisation
Variables dominantes
Approche multi-échelle

RÉSUMÉ

La gestion d'un territoire comme les Hautes Chaumes du Forez, présentant une certaine singularité, passe par une bonne compréhension des facteurs et processus qui participent à son organisation. Nous proposons ici une méthodologie, centrée sur le processus *Pegase*, mettant en évidence les variables physiques et anthropiques jouant un rôle primordial. En utilisant la notion d'entropie spatiale, nous montrons l'importance des effets d'échelles, leur prise en compte permettant la sélection de ces variables que nous appelons dominantes.

KEY WORDS

Landscape organization
Spatial entropy
Dominants variables
Multiscale approach

ABSTRACT

Identifying "dominant variables" in the organization of landscape: a multi-scale approach

Managing a unique territory such as the Forez Hautes Chaumes requires solid understanding of the factors and processes that contribute to its organization. Here we use the *Pegase* algorithm enabling the identification of the physical and anthropogenic variables that play dominant roles in landscape organisation. Through measures of spatial entropy, we illustrate the importance of scale in relation to the selection of variables that are found to be dominant in landscape organization.

1. Introduction

Parmi les différentes approches de la notion de paysage que l'on peut rencontrer dans la littérature, nous retenons ici l'approche géobotanique, centrée sur les facteurs environnementaux abiotiques et biotiques ainsi que les facteurs anthropiques (Farina, 1998). Le paysage est alors considéré comme une couverture végétale soumise à diverses contraintes physiques (topographique, climatiques...) et anthropiques (agricoles...).

Un certain nombre d'études ont cherché à modéliser la distribution de la végétation en fonction des facteurs physiques (Davis et Goetz, 1990 ; Florinsky et Kuryakova, 1996 ; Dymond et Johnson, 2002 ; Hörsch, 2003 ; Pueyo et Alados, 2007a) et/ou anthropiques (Tappeiner *et al.*, 1998 ; Pueyo et Alados, 2007b). Dans ce cadre, il est nécessaire de s'interroger sur la quantification du rôle de ces facteurs abiotiques et biotiques. En effet, afin de bien comprendre le fonctionnement de tels systèmes complexes, il faut rationaliser le choix des nombreux facteurs potentiellement intégrables. Cela est d'autant plus important que sont souvent négligés les effets d'échelle qui s'avèrent essentiels. De fait, une analyse à une

échelle donnée peut ne pas faire apparaître des phénomènes qui apparaîtraient à d'autres échelles (Allen et Hoekstra, 1992). L'importance des études multi-échelle en analyse écologique de paysage est donc d'un grand intérêt (Turner *et al.*, 1989 ; Jelinski et Wu, 1996 ; Wu *et al.*, 2000 ; Wu *et al.*, 2002).

L'objectif de cet article est de proposer, selon une approche multi-échelle, une méthodologie permettant de quantifier l'impact de nombreuses variables et de sélectionner celles dont le rôle est capital. Partant d'un terrain que nous connaissons bien et pour lequel nous possédons bon nombre de données, nous avons mis en place trois hypothèses :

- de nombreuses variables, physiques ou anthropiques, participent à la structuration du paysage. Il est possible de déterminer lesquelles et de quantifier leurs influences ;

- l'influence de ces variables est d'intensité variable en fonction de l'échelle considérée. On peut montrer à quelles échelles leur rôle est primordial ;

- parmi toutes ces variables, celles qui s'expriment à différentes échelles vont avoir un rôle majeur. Dans l'organisation du système spatial.

Après avoir présenté le terrain d'étude, nous montrerons comment notre méthode, centrée sur l'algorithme *Pegase*, permet de mettre en évidence des variables que nous qualifions de dominantes, par opposition aux variables nommées secondaires.

2. Terrain d'étude

Sujet de nombreux travaux (D'Alverny, 1907 ; Damon, 1972 ; Couhert, 1988 ; Thébaud, 1988 ; Janssen, 1990 ; Thébaud, 1990 ; Etlicher *et al.*, 1993 ; Bessenay, 1995 ; Jacqueminet et Thébaud, 2000 ; Porteret, 2001 ; Jacqueminet *et al.*, 2002 ; Mazagol, 2006), les Hautes Chaumes du Forez constituent un milieu bien particulier. Elles correspondent à la partie sommitale des Monts du Forez (figure 1) et présentent un paysage de landes, de pelouses et de tourbières acides sur environ 8500 hectares, culminant à 1634 mètres. Malgré une altitude modeste, l'étagement (végétation, sols, modelés, activités) s'y étale avec une rare vigueur (Etlicher *et al.*, 1993) et le relief génère de nombreux climats locaux très différenciés.

On note une dissymétrie climatique accusée avec un versant au caractère océanique marqué opposé à un versant oriental au caractère continental (Etlicher *et al.*, 1993). La saison hivernale s'étale de septembre à juin : l'enneigement est important (3 à 6 mois) et la température moyenne annuelle est inférieure à 6°C. Des vents violents balayent les Hautes Chaumes et provoquent la mise en place de nombreuses congères. La rigueur des conditions de vie est sévère.

De plus, l'exploitation pastorale apparaît comme déterminante dans la nature des différentes formations végétales (Thébaud, 1990). Mais depuis les années 50,

les Hautes Chaumes sont désormais vouées à de nouvelles pratiques agricoles en rupture complète avec les modèles traditionnels (Fel, 1962 ; Couhert, 1988). Elles subissent une déprise agricole se traduisant par un abandon progressif ou une surexploitation des parcelles pâturées, un regain des landes et une extension des surfaces forestières par reconquête naturelle ou reboisement volontaire qui risque à moyen et long terme de faire disparaître ces milieux ouverts (Jacqueminet *et al.*, 2002) qui ne représentent plus que 63 % du site.

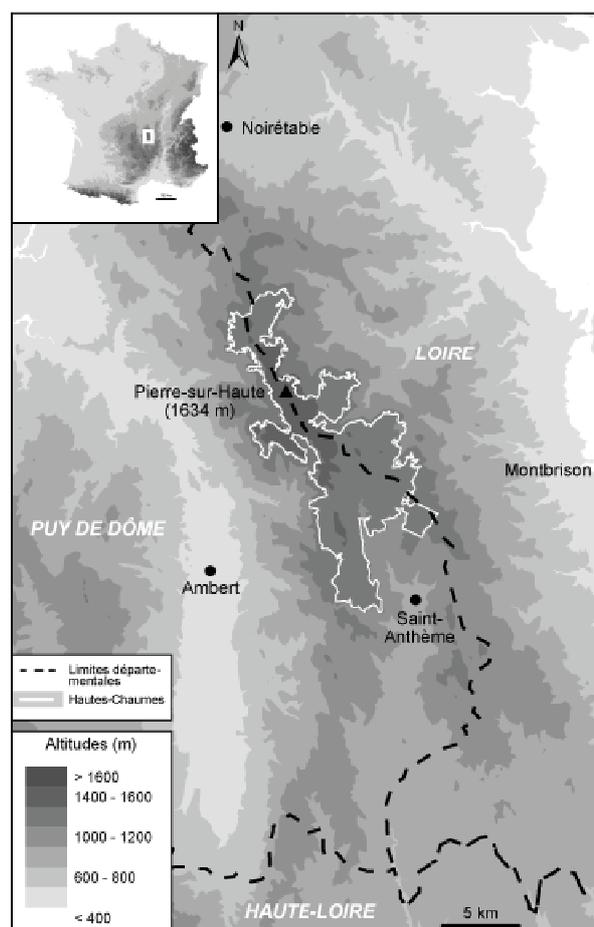


Figure 1. Localisation des Hautes Chaumes des Monts du Forez

Par ailleurs, la diversité paysagère des Hautes Chaumes en fait une zone touristique très attractive et très fréquentée, malgré son éloignement des grands centres urbains, ce qui induit certaines contraintes.

Présentant des habitats d'intérêt européens, notamment des milieux ouverts correspondant à la partie subalpine de l'étagement (Janssen, 1990), les Hautes Chaumes sont sources de préoccupations pour les gestionnaires, notamment du Parc Naturel Régional Livradois-Forez, qui souhaitent à la fois préserver les milieux naturels, maintenir les activités et les populations, et développer le touristique. Cela passe par une connaissance poussée des processus impliqués dans l'organisation et l'évolution du territoire.

3. Les données utilisées

3.1. La variable cible

Cette variable est la distribution des formations végétales des Hautes Chaumes établie à l'aide des images SPOT 4 de septembre 97 et juillet 98 (Jacqueminet et Thébaud, 2000). Il est important de signaler que la classification utilisée est une classification physiognomique et non phytosociologique.

Elle présente trois grands types de formations végétales : les formations forestières, les landes et les formations herbacées (figure 2). La « recolonisation

forestière » et les « landes hautes » traduisent la recolonisation des ligneux (Jacqueminet *et al.*, 2002). Le taxon « landes mixtes des milieux humides » inclue les tourbières. Les formations herbacées correspondent aux pelouses témoignant d'une forte pression pastorale.

Les fumades constituent un type de prairies de fauche bien particulier (D'Alverny, 1907) : localisées à proximité des jasseries (unités d'exploitation servant d'abri pour les bêtes, leurs gardiens, de réserves de nourriture et d'ateliers de fabrication de fromage, la fourme, avec cave d'affinage et entrepôt), elles bénéficient d'apports d'engrais, pendant la durée de l'estive, reçus des eaux de lavage de l'étable (Damon, 1972).

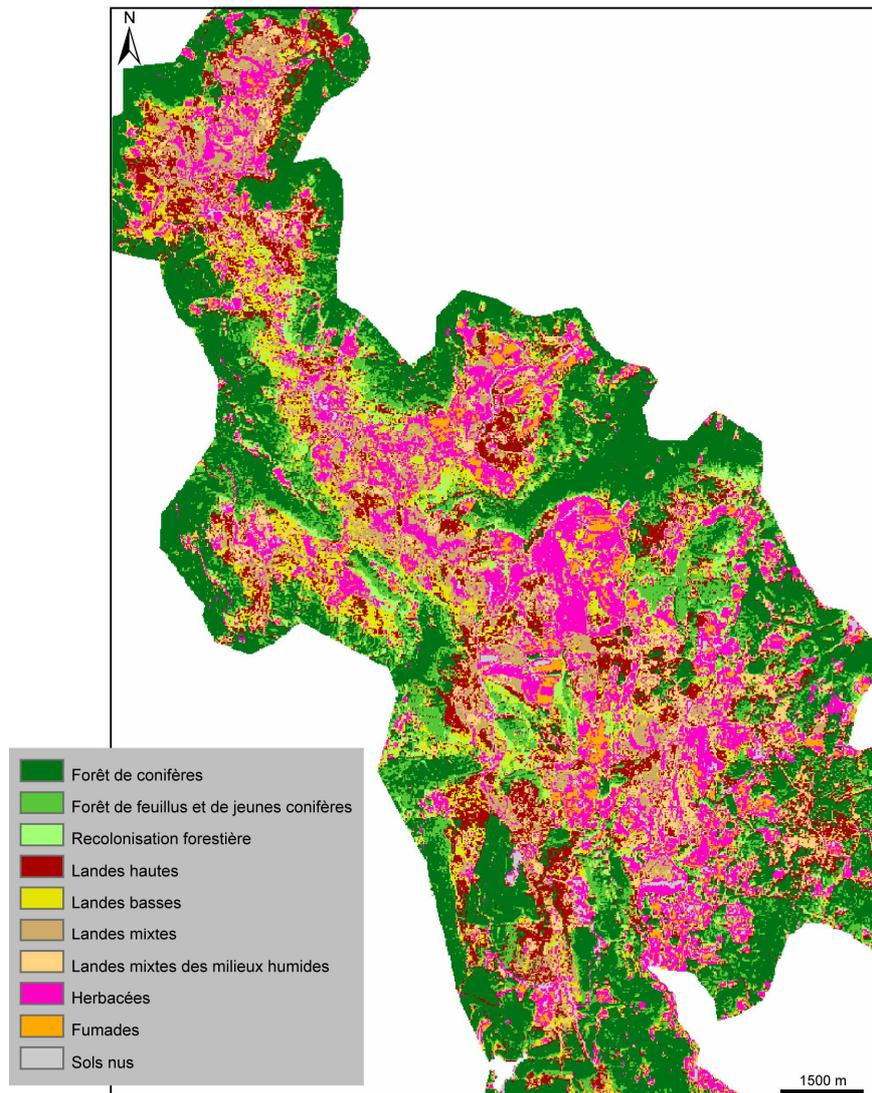


Figure 2. Formations végétales des Hautes Chaumes des Monts du Forez

3.2. Variables explicatives

Un certain nombre de variables ont une influence potentielle sur la distribution de la végétation et donc sur la structuration du paysage des Hautes Chaumes.

Nous intégrons 55 variables explicatives (tableaux 1 et 2).

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 conditionne les

caractéristiques microclimatiques et hydrologiques, la formation du sol et les propriétés de la couverture de végétation. La notion de disponibilité en eau étant déterminante, nous avons intégré l'indice d'humidité, la distance au réseau hydrographique (complémentaire de la cartographie des distances aux talwegs), la distance aux zones humides et la distance aux tourbières issue d'un travail de photo-interprétation et d'observations sur le terrain (Porteret, 2001 ; Mazagol et Porteret, 2006b).

La quantité d'énergie solaire reçue en un point donné du sol influence les processus biophysiques liés à la température de l'air ou des sols, à l'évapotranspiration et à la production primaire et donc la distribution et l'abondance des espèces végétales et animales (Beven et Kirkby, 1979 ; Moore *et al.*, 1991 ; Wilson et Gallant, 2000 ; Dymond et Johnson, 2002 ; Reuter *et al.*, 2005).

Facteurs	Influences	Références
Altitude	Climat, énergie solaire reçue, distribution de la végétation	Moore <i>et al.</i> , 1991
Pente	Distribution de la végétation, vitesse des eaux de surface, souterraines, et de ruissellement, précipitations locales, teneur en eaux des sols, processus géomorphologiques (instabilité des sols), ensoleillement et le rayonnement reçu. Influence sur l'occupation humaine des paysages	Moore <i>et al.</i> , 1991
Exposition	Insolation, évapotranspiration, distribution et abondance des espèces végétales et animales, climat local	Moore <i>et al.</i> , 1991
Courbures du relief	Dynamique de surface liée aux processus morphologiques. Détermination de la dynamique de l'eau extra et intra <i>Courbure verticale</i> : distribution de couverture végétale. Humidité des sols, pH, épaisseur de leurs horizons, teneur en matière organique. Accélération des écoulements, rapport entre érosion et dépôts, processus géomorphologiques. Indicateur des linéaments géologiques. <i>Courbure horizontale</i> : processus de convergence et de divergence des écoulements. Teneur en eau des sols et leurs caractéristiques. <i>Courbure verticale maximale</i> : lignes de crêtes. <i>Courbure verticale minimale</i> : formes de vallées. <i>Courbure moyenne</i> : convergence de flux et ralentissements. Humidité des sols et distribution de couverture végétale. <i>Courbures transversales et longitudinales</i> . <i>Courbures d'accumulation</i> : zones d'accumulation, de transit et de dissipation (Indice A.T.D.), prédiction des propriétés des sols.	Moore <i>et al.</i> , 1991 ; Florinsky, 2000
Distance aux crêtes	Effet de protection face aux phénomènes climatiques locaux. Sécheresse relative des sols (car zones de surface drainée minimale). Taux d'érosion. Production de sédiments et temps de concentration.	Speight, 1974
Distance aux talwegs	Pallie l'absence de cours d'eau non référencés dans les données hydrographiques. Mise en évidence les talwegs non marqués par la présence régulière d'eau ou secs. Propriétés des sols, humidité. Climat local, insolation. Circulation des vents.	
Rugosité et relief local relatif	Climat, vitesse des vents, dissipation des brouillards.	Brown <i>et al.</i> , 1998 ; Hörsch, 2003
Indice d'humidité	Rapport entre bassin versant et pente, processus d'accumulation. Humidité des sols. Distribution des zones de saturation. Évapotranspiration. Profondeur des nappes d'eau. Épaisseur d'horizon des sols. Matière organique. pH. Présence de vase, contenu de sable. Distribution du couvert végétal.	Beven et Kirkby, 1979 ; Moore <i>et al.</i> , 1991

Tableau 1. Différentes variables intégrées dans la base de données et leurs influences théoriques

La roche mère étant essentiellement représentée par des roches cristallines granitiques, nous avons donc écarté la prise en compte de la carte géologique ainsi que la distribution des sols, assez homogène et dominée par des rankers crypto-podzoliques. En revanche, nous avons intégré les formations superficielles (Etlicher, 1986), support du sol et de la végétation (tableau 1).

Quant aux facteurs anthropiques, la distance au réseau viaire rend compte de la pression touristique (randonnées et loisirs motorisés) et de l'accessibilité aux différentes zones du terrain d'étude, y compris pour l'activité agro-pastorale (troupeaux, engins agricoles). Quatre variables intègrent également cette dernière :

exploitation des surfaces, fréquentation animale, utilisation des terrains et parcellaire (tableau 2).

3.3. Construction des bases de données

Toutes les variables ont été intégrées au sein d'une base de données respectant une structure spécifique au logiciel *Pegase*. Pour ce faire, nous avons utilisé les outils *XLpeg* (Mazagol, 2005) et *Asc2Peg* (Mazagol et Mayoud, 2005), permettant l'automatisation de la création de bases de données à partir de fichiers au format ESRI ASCII Grid et donc l'intégration de données provenant de différentes sources et logiciels.

Variable	Stratégie de reclassement (tailles des noyaux de pixels)
Altitude	50m
Exposition	N, NE, E, SE, S, SO, O, NO (3×3, 5×5, 9×9)
Pente	2,5° (3×3, 5×5, 9×9)
Courbure verticale	Négative, nulle ou positive (3×3, 5×5, 9×9)
Courbure horizontale	
Courbure transversale	
Courbure longitudinale	
Courbure maximale	
Courbure minimale	
Courbure moyenne	
Indice ATD	Accumulation, Transit ou Dispersion (3×3, 5×5, 9×9)
Rugosité	4 m ² (3×3, 5×5, 9×9, 20×20 et 30×30)
Relief local relatif	15 m (3×3, 5×5, 9×9, 20×20 et 30×30)
Radiation solaire	75 kWh/m ²
Durée d'insolation	150 h
Indice topographique	1 (unité arbitraire)
Distance aux tourbières	50 m
Distance au réseau hydrographique	50 m
Distance aux talwegs	50 m
Distance aux crêtes	50 m
Distance aux chemins	50 m
Distance aux zones humides	50 m
Formations superficielles	Gros blocs de surface, arène meuble à blocs, roche subaffleureante, dallage sous-jacent avec arène meuble en surface, gros blocs de basalte en surface, basalte subaffleurant
Parcellaire	terrains privés, collectifs
Fréquentation animale	ovine, bovine, mixte ou nulle
Utilisation	Individuelle ou collective par des SICA, coopératives ou groupements
Exploitations des surfaces	terrains non utilisés ou boisés, pâturés et fauchés

Tableau 2. Les 55 variables explicatives et leur stratégie de reclassement au sein des bases de données

4. Méthode

4.1. Le processus Pegase

Notre méthode d'analyse est le processus *Pegase* (Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique). Basée sur les principes de la Théorie de l'information, cette méthode, développée par Michel Phipps (Phipps, 1981), utilise un algorithme qui permet la mise en évidence, la hiérarchisation et la quantification des facteurs explicatifs de l'organisation de l'espace. Son fonctionnement a été détaillé dans plusieurs publications (Phipps, 1981, 1995 ; Lundström-Gilliéron, 1999 ; Phipps, 2002, 2003 ; Mazagol, 2006) et éprouvé dans de nombreuses études, sur diverses problématiques (Phipps, 1981 ; Phipps *et al.*, 1986b, 1986a ; Dumanski *et al.*, 1987 ; Davis et Dozier, 1990 ; Phipps *et al.*, 1994 ; Phipps, 1995 ; Casado *et al.*, 1997 ; Graniero et Price, 1999 ; Lundström-Gilliéron, 1999 ; Ernoult *et al.*, 2003 ; Lundström-Gilliéron et

Schlaepfer, 2003 ; Mazagol, 2003 ; Phipps, 2003 ; Mazagol, 2006 ; Mazagol et Porteret, 2006a).

S'appuyant sur la théorie des systèmes discrets ou distribués, elle cherche à mettre en œuvre les concepts d'ordre et d'organisation dans un paysage et à en donner une mesure. Ces systèmes, mettant en jeu des informations prises en compte 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). Mais 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 des 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).

- une étude quantitative et globale, ne nécessitant pas de 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. 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). L'algorithme permet d'estimer la contribution de variables (explicatives) à l'organisation d'un espace, caractérisée par une variable cible.

4.2. Les notions clefs

4.2.1. 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). Dans le cadre de notre application, l'espace étudié est caractérisé par un système cellulaire (Figure 3). Chaque cellule est caractérisée par des descripteurs qui lui sont associés. On considère le système comme caractérisé par une variable U appelée variable cible.

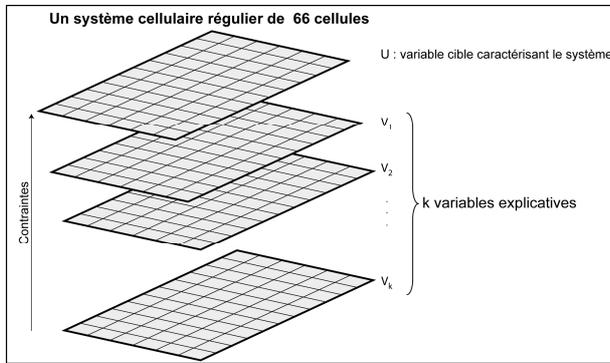


Figure 3. Représentation schématique des différents éléments du système cellulaire

Ce système présente une certaine entropie, une certaine hétérogénéité estimée par l'utilisation de la « formule de Shannon » :

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

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 :

$$H(U) = \frac{1}{N} \left[N \ln N - \sum_{j=1}^m f_j \ln f_j \right] \quad (2)$$

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, 2003).

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, 2003) et de saisir une propriété fondamentale du système. Il existe plusieurs façons d'exprimer cette néguentropie.

4.2.2. 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.

$$IM(U, V) = H(U) - H_V(U) \quad (3)$$

avec $H(U)$ l'entropie initiale du système (Équation 1) et $H_V(U)$ l'entropie conditionnelle (finale), tenant compte de l'ajout d'une contrainte due à la variable V selon :

$$H_V(U) = \sum_{j'=1}^{m'} [p_{j'} H_{V'}(U)] = - \sum_{j'=1}^{m'} p_{j'} \left[\sum_{j=1}^m p_{\theta(j,j')} \ln p_{\theta(j,j')} \right] \quad (4)$$

$p_{\theta(j,j')}$ 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 :

$$IM(U, E) = H(U) - H_E(U) \quad (5)$$

avec $H(U)$ l'entropie initiale (Équation 1), et $H_E(U)$ l'entropie conditionnelle (finale) de U , connaissant l'ensemble des environnements E issus de la procédure multivariée :

$$H_E(U) = - \sum_{i=1}^n [p_i H_{E_i}(U)] = - \sum_{i=1}^n \left[p_i \sum_{j=1}^m p_{\theta(j,i)} \ln p_{\theta(j,i)} \right] \quad (6)$$

où p_j est la probabilité d'avoir l'environnement E_i ($i=1, n$), et $p_{\theta(j,i)}$ 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 du « 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, 2003). Il a été démontré que ce critère tend de façon asymptotique vers la loi du χ^2 .

4.2.3. Le rapport de signification

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

$$SR = \frac{2NI(U, V_k)}{\chi^2_{(m-1)(m'-1)ddl}} \quad (7)$$

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.

4.2.4. La redondance R

La redondance est l'expression relative de la néguentropie :

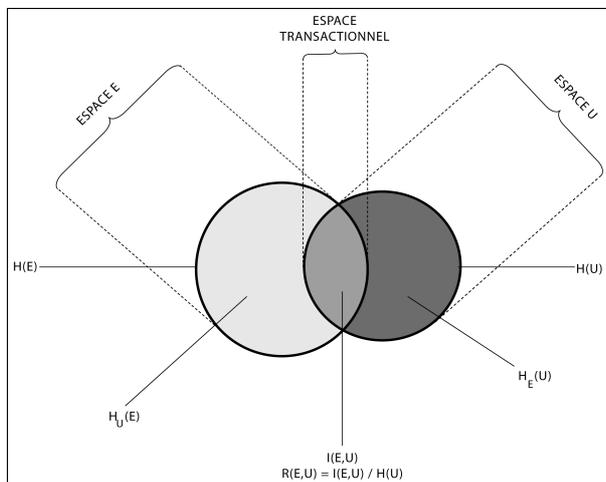
$$R_E(U) = \left(\frac{H(U) - H_E(U)}{H(U)} \right) \times 100 \quad (8)$$

Elle permet d'estimer la part, en pourcentage, de l'organisation du système U qui est levée par l'ensemble V . Il s'agit par ailleurs de la méthode recommandée par l'auteur de la procédure (Phipps, 2002).

3.2.4. La notion de canal d'information

Il s'agit d'un concept qui décrit le type de relation existant entre deux informations (figures 4 et 5).

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 dans le système traduite par l'information mutuelle ou la redondance. Une négentropie maximale (donc une 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.



Le chevauchement des deux cercles représente la redondance entre les deux espaces et l'organisation spatiale écologique du paysage (modifiée d'après Phipps, 1985)

Figure 4. Illustration du paysage vu comme un canal d'information entre l'espace E et l'espace U

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 a 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 4). Cependant, d'autres configurations peuvent se présenter (figure 5) :

$H(E)$ Entropie spatiale des combinaisons d'états de variables explicatives ; Entropie des messages issus des variables explicatives ; Complexité environnementale ;

$HU(E)$ 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 ;

$HE(U)$ 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.

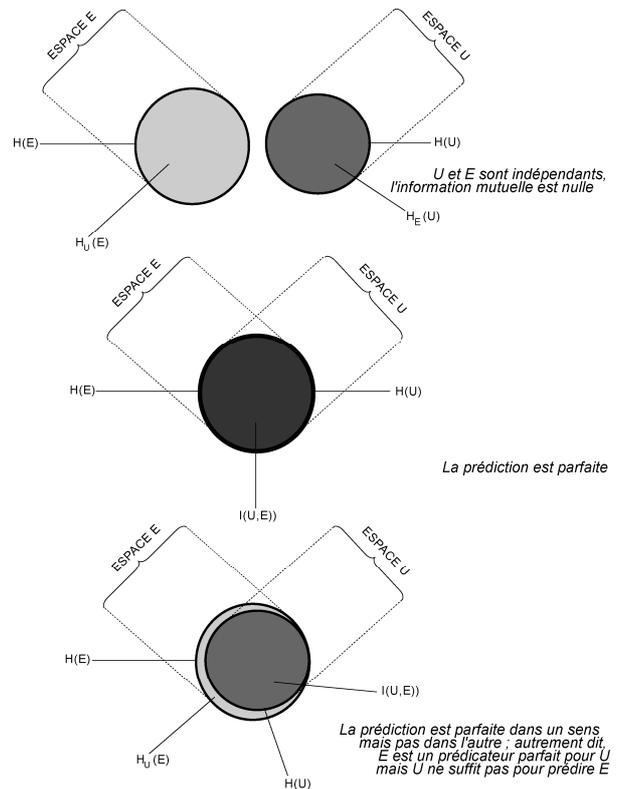


Figure 5. Représentations schématiques d'autres cas de canaux d'information (modifiée d'après Lundström-Gilliéron, 1999)

4.3. Déroulement du processus

Au cours de l'application de l'algorithme de *Pegase*, l'ensemble des unités est divisé progressivement par étapes (paliers P) en sous-ensembles significatifs de manière à en réduire l'entropie (figure 5).

À chaque palier, les sous-ensembles sont de mieux en mieux définis par les variables explicatives : dans un premier temps, *Pegase* détermine laquelle de ces variables permet de réduire au maximum l'entropie initiale. Cette variable est une variable divisive. Chaque sous-ensemble est une zone du système rassemblant des unités où :

- soit cette variable prend la même valeur (cas d'une variable qualitative);
- soit cette variable est supérieure ou inférieure à un certain seuil (cas d'une variable quantitative).

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).

En théorie, 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. En pratique, l'utilisateur stipule des règles d'arrêt :

- une entropie minimale au dessous de laquelle un sous-ensemble ne peut plus être divisé : la combinaison de variables explicatives qui mène à ce sous-ensemble suffit à déterminer l'état de la variable cible avec une certaine probabilité ;

- un nombre minimal de pixels au-dessous de laquelle un sous-ensemble ne peut plus être divisé, le test de signification statistique n'étant plus assuré.

Si aucune de ces deux règles ne s'applique, il se peut également qu'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'un choix délibéré.

L'espace est découpé en zones rassemblant les unités où cette variable divisive est la même (Terminal subsets : TSS). Pour chaque TSS, on aura une probabilité différente d'être en présence d'une certaine classe de la variable cible sous l'influence d'une combinaison particulière des variables explicatives, représentant la réduction maximum du nombre de configurations possibles. En fin de processus, l'entropie du système est réduite au maximum, en fonction d'une série de différents critères. *Pegase* fournit ainsi différentes métriques dont :

- l'entropie initiale ;
- l'entropie finale, calculé en fin d'application de l'algorithme ;
- la néguentropie, qui est la différence en entropie initiale et entropie final et dont la valeur exprimée en pourcentage est la redondance ;
- la contribution de chaque variable à la néguentropie (exprimée en pourcentage de néguentropie) ;
- la spécificité est le degré de dépendance des classes de la variable cible vis-à-vis des combinaisons de variables explicatives. Elle montre dans quelle mesure la présence d'une classe dans un TSS exclut celle des autres classes.

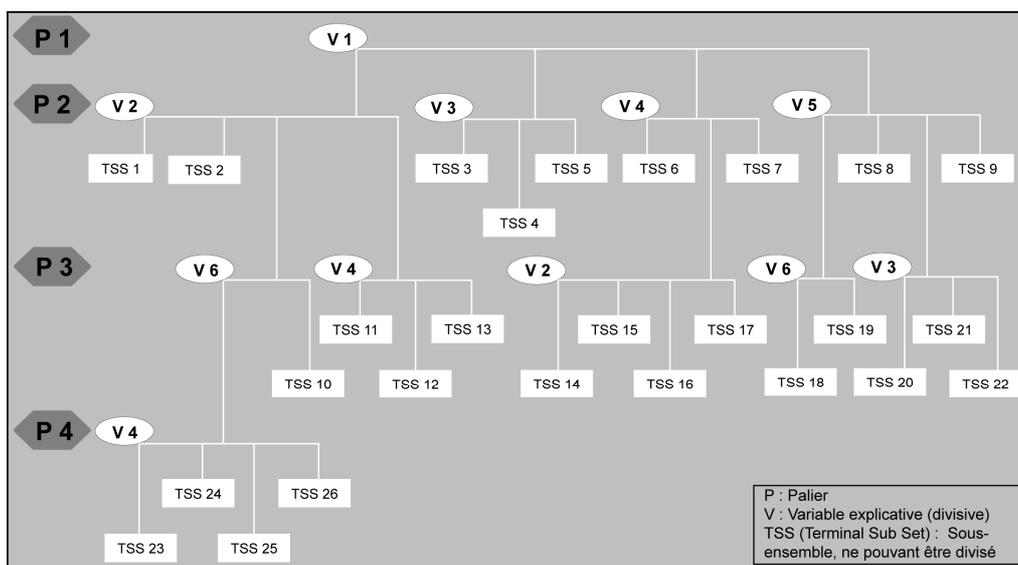


Figure 6. Dendrogramme de la division hiérarchique : 26 TSS sont obtenus en 4 paliers à l'aide de 6 variables divisives

4.4 Une approche multi-échelle

L'importance des études multi-échelle en analyse écologique de paysage est d'un grand intérêt (Turner *et al.*, 1989 ; Jelinski et Wu, 1996 ; Wu *et al.*, 2000 ; Wu *et al.*, 2002). Les structures spatiales apparentes et l'hétérogénéité sont fonction de l'échelle de résolution (Turner et Gardner, 1990) et des variations de l'aire étudiée (Baudry, 1992). Une analyse à une échelle donnée peut ne pas faire apparaître des phénomènes qui apparaîtraient à d'autres échelles (Allen et Hoekstra, 1992). Nous avons donc souhaité mettre en jeu cette notion d'échelle en faisant varier la résolution et l'étendue des zones considérées. Nous ajoutons une troisième composante à cette notion d'échelle : la taille des noyaux de pixels permettant l'estimation de certains facteurs (comme les pentes, les courbures...) obtenus par une analyse du voisinage de cellules. Les conditions d'application de formules mathématiques ont en effet une influence sur les résultats obtenus, exprimant alors des phénomènes ou des processus différents (Mazagol, 2006).

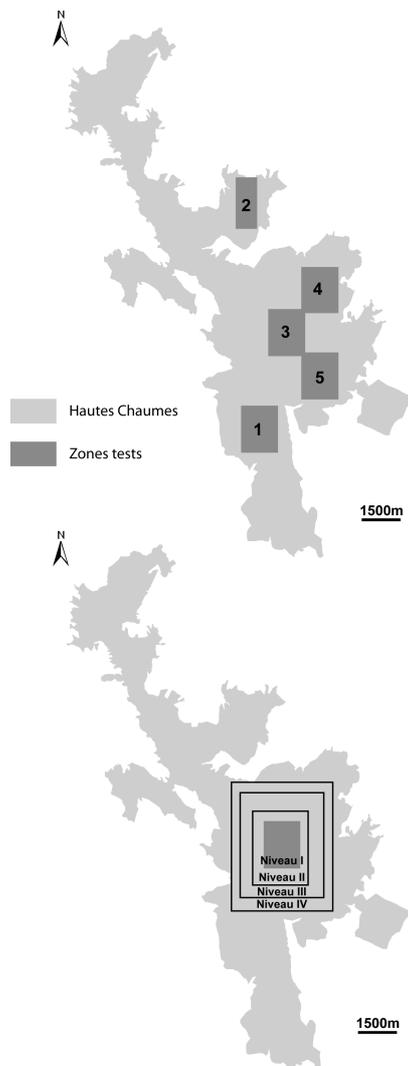


Figure 7. Localisation des 5 zones-tests et augmentation de l'étendue de la zone 3 du niveau I à IV

Afin de faire jouer l'échelle, nous avons sélectionné cinq zones-tests (figure 7) qui possèdent une distribution et une fréquence de types d'occupation du sol qui leur sont propres. Leurs étendues sont de niveau I (z1nI, z3nI, z4nI) et choisies pour que le nombre de cellules soit important aux hautes résolutions et suffisant aux plus faibles.

Les zones 3, 4 et 5 sont localisées dans la partie centrale des Hautes Chaumes. Le domaine étant moins étroit, c'est à partir d'elles que l'augmentation de l'étendue des zones est la plus facilement réalisable. Cette dernière se fait selon les niveaux II, III puis IV (z3nIV, z4nIV et z5nIV étant identiques) (figure 7).

Ce sont donc 12 zones distinctes qui sont considérées. De plus chacune d'elles est étudiée à plusieurs résolutions : 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100m.

Chaque zone sélectionnée a fait l'objet, pour chaque étendue et pour chaque résolution, de la construction d'une base de données *Pegase*. Ainsi, ce sont 108 bases de données qui ont été mises en place, puis traitées indépendamment à l'aide du logiciel.

4.5. Traitements et analyses des résultats

Paramètres d'exécution

Chacune des 108 bases sont alors traitées indépendamment dans *Pegase* en utilisant les réglages suggérés par Phipps (2002) :

- effectif minimum des TSS : 30 ;
- entropie minimale requise pour subdiviser un TSS : 0,3 ;
- nombre de paliers : 20 ;
- critère de sélection de la variable divisive : redondance.

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à trois des indicateurs fournis par *Pegase* : la redondance, la contribution et la spécificité.

Nombre minimum de cellules

Il est important de noter ici qu'un nombre de cellules faibles ne permet pas d'obtenir un nombre de divisions garantissant des résultats satisfaisants. L'augmentation de la résolution faisant diminuer le nombre de cellules, il n'est pas alors possible de prendre en compte toutes les résolutions selon l'étendue de la zone considérée. Les limites d'applications seront déterminées par l'étude de l'évolution de la redondance en fonction de l'échelle.

Règles de sélection des variables dominantes

La sélection des variables dominantes est soumise à deux règles, issues d'une réflexion sur les résultats de nos différents traitements. La première stipule que la contribution d'une variable à la néguentropie est significative si elle est supérieure à 5%. Certaines

variables sont alors écartées. Une deuxième règle impose qu'une variable doit contribuer de manière significative à plus de la moitié des résolutions considérées et à au moins une des étendues, pour être dominante.

Validation de la sélection

La sélection, réalisée à partir des zones tests, est ensuite testée sur une base de données concernant l'ensemble des Hautes Chaumes, à la résolution la plus fine. Pour l'alléger, nous avons écarté les indices estimés pour des noyaux de 3 et 5 cellules, sauf pour l'exposition 5×5 (puisque, nous le verrons, cette variable s'avère dominante). La rugosité et le relief local relatif ont été reclassés, car ils présentaient, pour de larges fenêtres, trop de classes pour *Pegase*. Nous avons donc doublé leur valeur de reclassement.

Cette base de données (appelées HC), comportant alors 33 variables explicatives plus la variable cible, a été analysée dans trois conditions, en activant :

- les 33 variables explicatives : base HC1 ;
- les 16 variables dominantes seules : base HC2 ;
- les 17 variables secondaires seules : base HC3.

Ces trois cas de figures ont alors été traités et les résultats obtenus comparés. Des résultats concluants et proches pour HC1 et HC2 et faibles pour HC3 nous permettrons de valider les hypothèses formulées en introduction.

5. Résultats

Les résultats présentés ci-dessous ne concernent que la zone 3 et ses quatre niveaux d'étendue. Ce n'est que lors de la sélection des variables dominantes que nous élargirons l'analyse aux résultats à l'ensemble des zones considérées.

5.1. Redondance en fonction de la résolution et de l'étendue

La redondance, quel que soit le niveau d'étendue considéré, diminue avec la résolution. Cependant, ce sont les étendues les plus élevées (III et IV) qui produisent la meilleure redondance et ce, à chaque résolution (Figure 8), l'aspect des courbes étant sensiblement le même pour ces niveaux.

Aux étendues les plus faibles, on note que la courbe a un comportement erratique à compter d'une certaines résolutions (50 m pour le niveau I et 80 m pour le niveau II). Un tel comportement est caractéristique d'un nombre insuffisant de cellules pour mener à bien le processus. Ces deux limites nous serviront lors de la sélection des variables dominantes et sont valables quelle que soit la zone considérée.

La qualité des résultats est étroitement lié à la quantité d'information disponible pour exécuter le processus : un nombre élevé de cellules (fortes étendues et résolution) permet de mieux cerner le système ce qui induit une redondance plus importante.

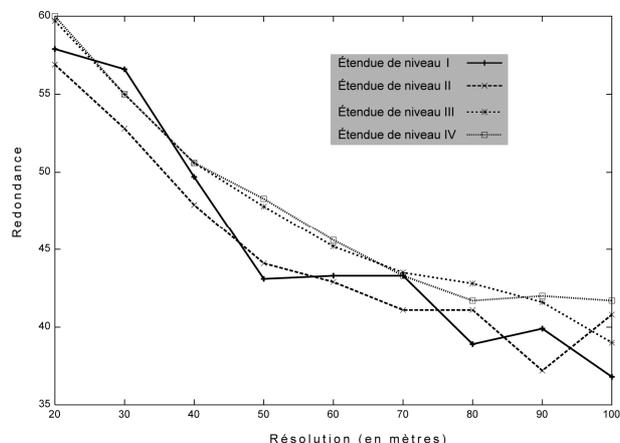


Figure 8. Évolution de la redondance en fonction de la résolution et de l'étendue (zone 3)

5.2. Spécificités en fonction de la résolution et de l'étendue

Les spécificités des classes de la variable cible montrent l'existence d'un gradient caractérisé par une forme « fer à cheval » (Figure 9) quel que soit le niveau d'étendue considéré.

Il faut noter que cette configuration, bien qu'intéressante, est largement dépendante évidemment de l'ordre dans lequel sont rangées les classes.

Il semble qu'il s'agisse clairement d'un gradient de biomasse décroissante (tableau 3). Les classes extrêmes montrent la plus grande spécificité, permettant une meilleure détection des relations écologiques qui contrôlent la distribution spatiale du couvert végétal. Elles représentent des conditions extrêmes et contraignantes permettant à l'algorithme de reconnaître clairement ces « niches paysagiques ». Au centre du gradient, les rapports entre types de couverture et conditions environnementales sont plus ubiquistes.

Ce gradient est observé quel que soit le niveau d'étendue (Figure 9) et quelle que soit la zone. Mais il est d'autant mieux défini que l'étendue est forte et ce en lien avec la quantité d'information disponible.

Les spécificités nous seront utiles plus tard, lors de la validation des résultats.

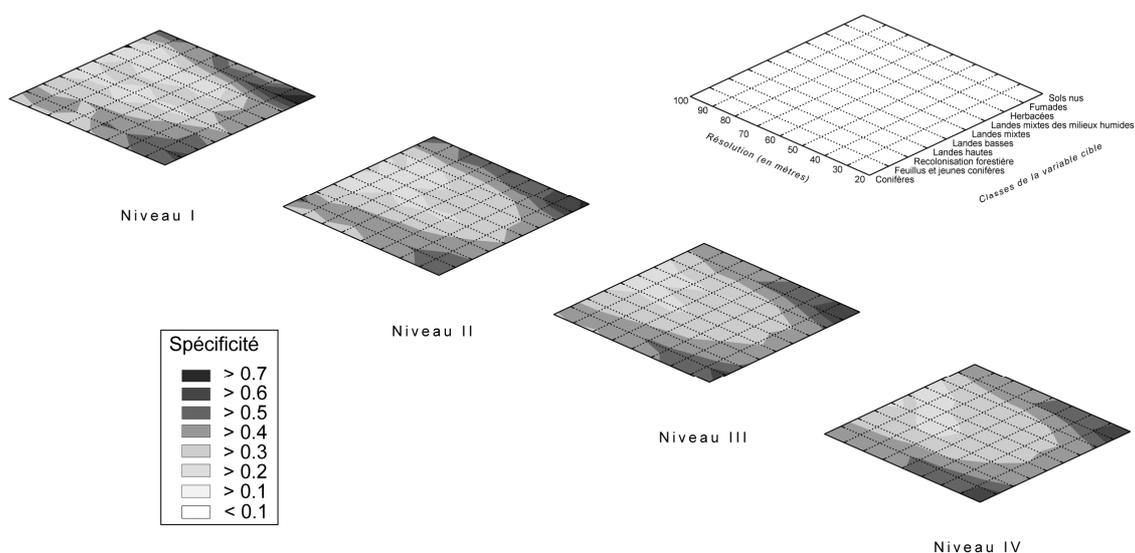


Figure 9. Évolution des spécificités des différentes classes de la variable cible en fonction de la résolution et de l'étendue (zone 3)

Zone	Classe d'occupation du sol	Influences, contraintes subies
1 ^{er} pôle	Groupes forestiers	Altitude (étagement de la végétation), topographie favorable, action anthropique (plantations souvent dépendantes de la topographie).
Centre	Landes	Milieux les plus représentés et donc les moins assujettis à des conditions strictes
2 ^{ème} pôle	Fumades	Localisation de la jasserie à laquelle elles sont liées, et donc topographie, présence d'une source en amont, présence d'un drain...
	Soils nus	Zones favorables à de fortes érosions. Si parcelles labourées ou fauchées : autres facteurs

Tableau 3. Gradient de biomasse soulevé par les spécificités aux différentes échelles

5.4. Contributions en fonction de la résolution et de l'étendue

Sur la figure 10, nous avons reporté en noir les résolutions auxquelles une des variables contribue à plus de 5 %.

Les variables intégrées dans les bases de données, mais n'apparaissant dans ce tableau ne contribuent jamais à hauteur d'au moins 5 %, et ce, à aucune étendue ou résolution. Il s'agit donc d'ici de la stricte application de la première règle de sélection.

Les résolutions grisées pour les niveaux I et II sont celles écartées par l'étude de la redondance.

La deuxième règle nous conduit ainsi à sélectionner 10 variables dominantes correspondant à celles dont le nom est grisé dans la Figure .

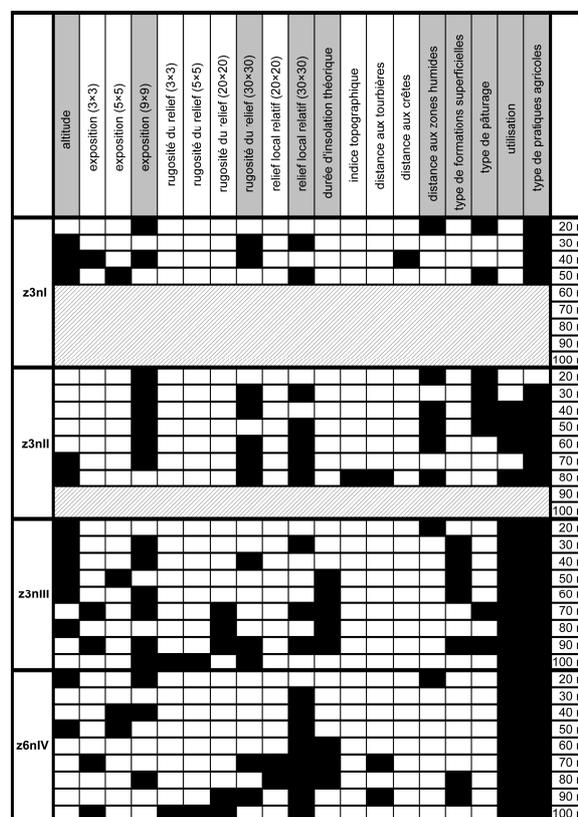


Figure 10. Mise en évidence des variables contribuant de manière significative à la néguentropie et des variables dominantes (zone 3)

5.5. Résultats obtenus pour l'ensemble des bases de données

En procédant ainsi pour l'ensemble des zones étudiant l'ensemble des zones, 6 variables supplémentaires sont sélectionnées, ce qui au total, donne donc 16 variables dominantes : altitude, exposition 5×5 et 9×9, rugosité

du relief 30×30, relief local relatif 30×30, radiation solaire théorique, durée d'insolation théorique, distance aux tourbières, distance aux talwegs, distance aux crêtes, distance aux zones humides, formations superficielles, parcellaire, fréquentation animale, utilisation, exploitation des surfaces.

Ce sont les variables dominantes dans l'organisation du paysage des Hautes Chaumes des Monts du Forez.

5.6. Validation de la sélection de variables dominantes

Cette sélection reste à être validée. Nous avons mis en place la base de données HC et l'avons donc traité dans les 3 conditions tests (tableau 4).

	HC1	HC2	HC3
Entropie initiale	2,122		
Entropie finale	0,882	0,925	1,368
Néguentropie	1,241	1,197	0,754
Redondance	58,4 %	56,4 %	35,5 %
Complexité	9,468	9,442	9,16

Tableau 4. Résultats obtenus pour les bases de données de validation (HC1, HC2, HC3)

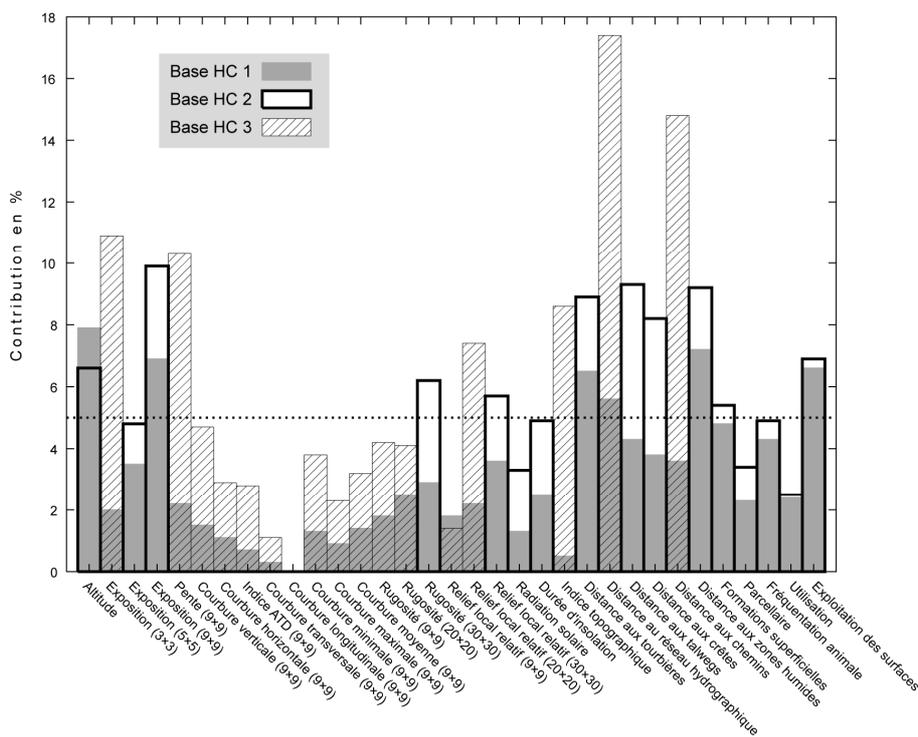


Figure 10. Contributions des variables explicatives (HC1, HC2 et HC3)

Les comportements des spécificités sont proches de ceux observés précédemment (Figure 11), la configuration du graphique faisant apparaître le gradient. On note une faible diminution des valeurs dans le cas de HC 2. Pour HC3, les résultats montrent que les variables explicatives sélectionnées cernent de

La redondance est de 58,2 % pour HC1 et 56,4 % HC2. La néguentropie est donc pratiquement identique avec deux fois moins de variables. Ces valeurs sont respectivement inférieures de 1,8 % et 3,6 % à celles observées pour la zone z3nIV. Mais il faut rappeler que les variables exclues de ces deux analyses contribuent, même de façon infime, à l'entropie du système. Les inclure aurait certainement permis d'obtenir un résultat au moins égal à celui de la zone z3nIV.

A l'inverse, pour HC3, la redondance est seulement de 35,5 %. L'ensemble des variables sélectionnées cerne alors le système de manière insatisfaisante.

Pour HC 1, on note 7 variables ayant une contribution supérieure à 5 % (figure 11). Toutes, sauf la « distance au réseau hydrographique » (cependant très proche des « distances aux talwegs »), ont été identifiées comme variables dominantes. Avec HC2, la contribution des variables dominantes augmente, sauf l'altitude. Dans le cas de HC1, le rôle effectif des variables dominantes est masqué par d'autres variables corrélées avec elles, entraînant la baisse de leur pertinence.

manière insatisfaisante les contraintes exercées par les variables explicatives.

Ces résultats montrent donc l'importance des variables dominantes, telles que nous les avons sélectionnées, dans l'organisation des Hautes Chaumes. A elles seules,

elles contribuent pratiquement autant à cette organisation que toutes les variables réunies.

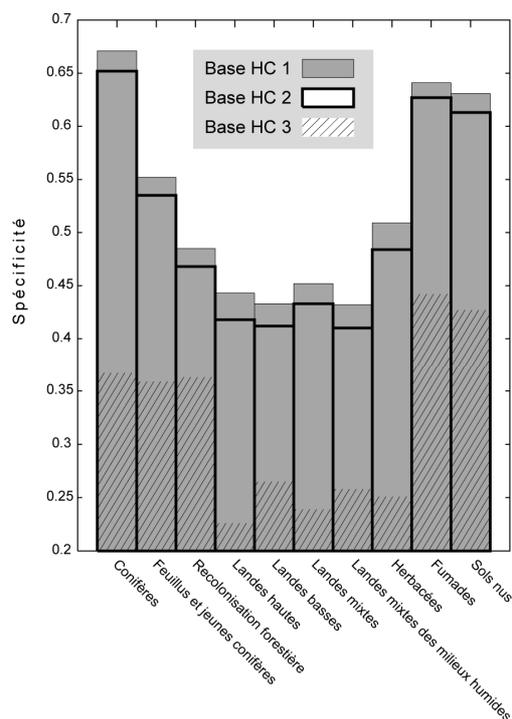


Figure 11. Spécificités des classes de la variable cible (HC1, HC2 et HC3)

6. Discussion

Parmi les atouts de *Pegase*, nous avancerons entre autres la possibilité d'intégrer indifféremment des variables de nature qualitative, hiérarchique ou quantitative (Phipps, 2003), comme avec la plupart des méthodes relevant des arbres de décision, là où les méthodes plus classiques nous imposeront un seul type de variables. Plus généralement, notons également la puissance apportée en analyse spatiale par les outils offerts par la théorie de l'information.

Notre utilisation de *Pegase* apparaît comme novatrice pour deux principaux points :

- l'utilisation de bases de données de très grandes tailles, par rapport à celles utilisées dans les applications déjà existantes ;
- l'application dans un contexte multi-échelle.

La mise en évidence des « variables dominantes » est le point-clé des résultats. Elle permet de réduire la taille de la base de données et de s'affranchir des effets de masquage entre variables. Leur non identification préalable peut conduire à sous-estimer leur influence. L'importance d'un contexte multi-échelle lors de l'utilisation de *Pegase* s'avère donc ici d'un grand intérêt.

Cependant, pour toutes les bases de données, nous avons « expliqué » au mieux que 60 % de l'organisation du paysage. Ce résultat, bien qu'important au vu des applications déjà existantes, reste insuffisant puisque 40 % ne sont pas expliqués. Plusieurs raisons peuvent être avancées :

- le hasard possède une part non négligeable dans l'organisation du système mais il ne saurait en expliquer à lui seul 40 % ;

- il existe d'autres variables structurantes. Le paysage se forme et change en fonction d'une grande diversité de facteurs inhérents à différents domaines (écologie, climat, histoire, économie...). L'idéal serait d'approcher cette globalité au plus près possible mais, dans cette tentative, on se heurte à des obstacles multiples et difficiles à surmonter (par exemple, cerner les influences du micro-climat) ;

- certaines variables sélectionnées interviennent de façon infime, voire nulle (comme les courbures) : soit elles ne jouent aucun rôle, soit leur estimation est tronquée par la qualité de la donnée source, soit leur rôle effectif est masqué par d'autres variables qui leur sont corrélées.

Les effets d'échelle prennent ici une place prépondérante. La résolution agit sur les résultats, sa diminution induisant une perte d'information, réduisant la complexité du processus et la redondance et conduisant soit à la minimisation, soit à la maximisation de la contribution de certaines variables. Ainsi, mener une étude à une seule résolution risquerait de négliger l'action de certaines variables, les analyses à haute résolution faisant apparaître des phénomènes de voisinage de cellules gommés à basse résolution. Cela confirme l'intérêt des études multi-échelles afin de ne pas négliger des aspects importants intervenant dans les processus d'organisation.

Malgré l'homogénéité du territoire, chaque zone à chaque étendue présente son organisation propre. Une simple étude de l'ensemble de ce territoire ne saurait permettre l'extrapolation à une zone plus restreinte. A l'inverse, l'étude d'une seule zone ne saurait expliquer l'organisation de la totalité du territoire. Cependant, de subdivision en subdivision, il est difficile de fixer le moment où l'on peut considérer que la portion analysée est structurellement homogène. Cela ramène à notre sélection des zones, de leurs étendues, de leurs résolutions. Malgré cela, certaines constatations restent valables pour chacune d'elles, légitimant par la même occasion les résultats obtenus. Par exemple, le comportement des spécificités reste sensiblement identique d'une zone à l'autre. Cela tend donc à valider là encore nos résultats.

D'autre part, l'ajout aux notions de résolution et d'étendue de celle de taille de noyaux de pixels s'avère très intéressante. En effet, de nombreuses variables utilisées ont été estimées à l'aide de fenêtres flottantes de tailles différentes. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les fenêtres les plus larges : elles

permettent de mieux cerner les grands traits du relief alors que les plus petites vont plutôt mettre en évidence les variations locales. Ce phénomène ne doit pas être négligé.

Enfin, certains points de notre méthodologie sont critiquables :

- la précision et la validité des données utilisées : C'est le cas par exemple des données liées aux pratiques pastorales qui peuvent ne pas refléter la réalité de cette pression anthropique de manière satisfaisante, du fait notamment de leur ancienneté et de leurs limites. De plus, la cartographie de la végétation s'est avérée comporter une certaine quantité d'erreurs qui ont de la procédure divisive (Mazagol, 2006), mais il serait intéressant de voir ce que donnerait l'utilisation de données corrigées.

- la zone de plus haut niveau d'étendue est commune aux zones de niveau I ce qui amène à s'interroger sur l'impact de la variation de l'étendue sur les résultats. Notre choix induit que plus cette dernière augmente, plus on tend vers une seule et même zone. Ce choix est cependant lié à l'étroitesse du territoire qui ne nous a pas permis de diversifier les zones tests ;

- il sera intéressant de tester notre méthodologie sur un autre terrain d'étude. Appliquer ces traitements sur un territoire alternatif, avec éventuellement des étendues plus importantes, une structure différente, soumis à des contraintes variées permettrait de valider nos résultats ;

- l'influence des stratégies de reclassements des différentes variables n'a pas été éprouvée. 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. De même, les pentes ou les distances par rapport aux crêtes ou aux

talwegs ont été reclassées de manière linéaire. Cela mérite réflexion et nécessitera de tests complémentaires.

7. Conclusion

L'utilisation de la méthode *Pegase* au sein de notre méthodologie multi-échelle a montré son intérêt. Il nous a été possible de valider les trois hypothèses que nous avons formulées en introduction :

- un certain nombre de variables structurant le paysage a été mis en évidence et nous avons pu estimer leurs contributions à l'organisation du paysage (hypothèse 1) ;

- la mise en place d'une analyse multi-échelle est primordiale. En travaillant conjointement à différentes résolutions et à différentes étendues, nous avons pu sélectionner un certain nombre de variables et en exclure d'autres (hypothèse 2) ;

- les seules variables explicatives ainsi sélectionnées permettent une négentropie quasiment identique à celle obtenue avec l'ensemble des variables considérées au départ. Leur influence est donc majeure sur l'organisation du paysage (hypothèse 3).

Il reste cependant plusieurs pistes de réflexion à explorer afin d'optimiser notre méthode. De plus, tous les résultats obtenus n'ont pas été présentés ici. En effet, *Pegase* fournit également d'autres indications sur l'organisation du système spatial analysé et semble pouvoir être proposé comme outil d'aide à la mise en place de cartographies par classification automatique (Mazagol, 2006).

8. Références bibliographiques

- Allen T. F. H., Hoekstra T. W., 1992, *Toward a Unified Ecology*, Columbia University Press, New York,
- Baudry J., 1992, Approche spatiale des phénomènes écologiques : détection des effets d'échelles, in Auger P. et al. (eds.), *Hiérarchies et échelles en écologie*, Naturalia Publications, Turriers, 157-171.
- Baudry J., Burel F., 1985, Système écologique, espace et théorie de l'information, in Berdoulay V., Phipps M. (eds.), *Paysage et système*, Ottawa, 87-102.
- Bessenay C., 1995, La gestion des données environnementales dans un espace naturel sensible : le Système d'Information Géographique des Hautes-Chaumes foréziennes, Université Jean Monnet, Saint-Étienne.
- 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.
- 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.
- 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, Université de Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand.
- 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, Université Lyon II, Lyon.

- Davis F. W., Dozier J., 1990, Information analysis of a spatial data base for ecological land classification, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 56, 605-613.
- Davis F. W., Goetz S., 1990, Modeling vegetation pattern using digital terrain data, *Landscape Ecology*, 4, 69-80.
- 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.
- 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.
- Ernault A., Bureau F., Poudevigne I., 2003, Patterns of organisation in changing landscapes: implications for the management of biodiversity., *Landscape Ecology*, 18, 239-251.
- 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, Université Lyon II, Lyon.
- Etlicher B., Bessenay C., Couhert J.-P., Fauray 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-Étienne, Saint-Étienne.
- Farina A., 1998, *Principles and methods in landscape ecology*, Chapman and Hall, Cambridge.
- Fel A., 1962, Les Hautes Terres du Massif Central, tradition paysanne et économie agricole, Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand.
- 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., Kuryakova G., 1996, Influence of topography on some vegetation cover properties, *Catena*, 27, 123-141.
- 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.
- 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.
- 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 2002*, Paris, 9-11 avril 2002.
- Jacqueminet C., Thébaud G., 2000, Cartographie des formations végétales des Hautes-Chaumes à l'aide des images SPOT, in Couhert J.-P. et al. (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, 3.
- Janssen C. R., 1990, Histoire de la végétation des Monts du Forez, in Berger et al. (ed.) *Les Monts du Forez : le milieu et les hommes*, Centre d'Etudes Foréziennes, Saint-Etienne, 65-79.
- Jelinski D., Wu J., 1996, The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology, *Landscape Ecology*, 11(3), 129-140.
- Kullback S., 1959, *Statistics and Information Theory*, J. Wiley and Sons, New York.
- 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., Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Lundström-Gilliéron C., Schlaepfer R., 2003, Hare abundance as an indicator for urbanisation and intensification of agriculture in Western Europe, *Ecological Modelling*, 168, 283-301.
- Mazagol P.-O., 2003, Influence des variables physiographiques sur l'organisation d'un paysage, *14ème Rencontres Régionales de la Recherche*, Région Rhône-Alpes, Saint-Étienne, 21 Octobre 2003.
- Mazagol P.-O., 2005, XLPeg : Outil de mise en place d'entêtes de bases de données Pegase, CRENAM.
- Mazagol P.-O., 2006, Recherche de variables contribuant à l'organisation d'un paysage de moyenne montagne : le cas des Hautes Chaumes du Forez, Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Étienne.
- 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,
- Mazagol P.-O., Porteret J., 2006a, Étude de l'organisation du couvert végétal des Hautes Chaumes du Forez : un exemple d'utilisation de l'algorithme Pegase sur le secteur tourbeux de Gourgon-Bazanne pour l'année 1962, *Colloque RTP "MoDyS"*, CNRS, Lyon, 8-9 novembre 2006.
- Mazagol P.-O., Porteret J., 2006b, Étude de l'organisation du couvert végétal des Hautes Chaumes du Forez : un exemple d'utilisation de l'algorithme Pegase sur le secteur tourbeux de Gourgon-Bazanne pour l'année 2001, *Colloque RTP "Paysage et environnement"*, CNRS, Chilhac, 27-30 septembre 2006.
- Mazagol P.-O., Porteret J., à paraître, Étude de l'organisation du couvert végétal des Hautes Chaumes du Forez : un exemple d'utilisation de l'algorithme Pegase sur le secteur tourbeux de Gourgon-Bazanne (année 2001), in Galop D. (ed.) *Paysage et Environnement : de la reconstitution du passé aux modèles prospectifs*, Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, 285-299.
- 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.
- 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. (ed.) *Méthodes et réalisation de l'écologie du paysage dans l'aménagement du territoire*, Polysciences Publications, 15-24.
- Phipps M., 2002, PEGASE operation manual, Université d'Ottawa.
- Phipps M., 2003, Espace, entropie, environnement, *Actes des Cinquièmes Rencontres de ThéoQuant*, Université de Franche-Comté, Besançon, 22-23 février 2001.

- Phipps M., Baudry J., Burel F., 1986a, 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., Baudry J., Burel F., 1986b, 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., 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.
- 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, Saint-Étienne.
- Pueyo Y., Alados C. L., 2007a, Abiotic factors determining vegetation patterns in a semi-arid Mediterranean landscape: Different responses on gypsum and non-gypsum substrates, *Journal of Arid Environments*, 69, 490-505.
- Pueyo Y., Alados C. L., 2007b, Effects of fragmentation, abiotic factors and land use on vegetation recovery in a semi-arid Mediterranean area, *Basic and Applied Ecology*, 8, 158-170.
- 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.
- Speight J. G., 1974, A parametric approach to land form region, *Special publication Institute of British Geographers*, 7, 213-230.
- Tappeiner U., Tasser E., Tappeiner G., 1998, Modelling vegetation patterns using natural and anthropogenic influence factors: preliminary experience with a GIS based model applied to an Alpine area, *Ecological Modelling*, 113, 225-237.
- 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, Université Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand.
- Thébaud G., 1990, La végétation du Haut-Forez, in Berger *et al.* (ed.) *Les Monts du Forez : le milieu et les hommes*, Université Jean Monnet, 37-63.
- 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.
- 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.
- Wilson J. P., Gallant J. C., 2000, *Terrain analysis: principles and applications*, John Wiley and Sons, New York.
- Wu J., Jelinski D. E., Luck M., Tueller P. T., 2000, Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics, *Geographique 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.