

ETUDE DE L'ORGANISATION DU COUVERT VEGETAL DES HAUTES CHAUMES DU FOREZ : UN EXEMPLE D'UTILISATION DE L'ALGORITHME PEGASE SUR LE SECTEUR TOURBEUX DE GOURGON-BAZANNE POUR L'ANNEE 1962

Pierre-Olivier Mazagol et Jérôme Porteret

Crenam – UMR 5600, Université Jean Monnet, Saint-Étienne

Terrain d'étude

- Le secteur d'étude de Gourgon - Bazanne se situe dans la partie centrale des Monts du Forez, où les Hautes Chaumes s'élargissent pour atteindre 9 kilomètres, leur largeur maximale (Etlicher 1990 ; Etlicher *et al.* 1993). À la limite des départements de la Loire et du Puy de Dôme, la zone sélectionnée s'inscrit dans un rectangle de 4.7 km (Est / Ouest) par 5.3 km (Nord / Sud) de côtés, entre 1000 et 1420 m. Centrée sur les édifices volcaniques de Roche Gourgon et Grande Pierre Bazanne, c'est là que naissent les principaux cours d'eaux qui drainent le massif en direction de la Loire. Les conditions climatiques montagnardes sont favorables au développement des tourbières. Elles occupent 202 hectares dans notre secteur d'étude et atteignent des profondeurs de 2.5 à 3 m. Ces écosystèmes présentent un intérêt majeur de par leur rôle hydrologique et leur potentiel paléo-environnemental (Porteret 2001 ; Cubizolle 2005). La tourbière de Gourgon, qui est l'une des plus anciennes tourbières du Massif Central (11000 ans), constitue aujourd'hui un site de référence dans le cadre du programme européen PEAT-BANK, dont l'objectif est de mettre en place un suivi scientifique des tourbières à l'échelle européenne. Ces zones humides se trouvent au cœur de terroirs pastoraux façonnés par l'homme au cours des siècles. Sur les Hautes Chaumes s'est mis en place un système agro-pastoral spécifique d'estive, avec pâturage et fauche, pour la transformation du lait (fabrication de fourme). Centré autour de la jasserie, bâtiment d'estive regroupant l'étable, le fenil et l'habitation, il a modifié les écoulements par la mise en place d'un réseau d'irrigation complexe et créé de vastes prés fertilisés, les fumades. Ce système a progressivement disparu au cours du XX^{ème} siècle, entraînant une modification de l'utilisation de l'espace montagnard. D'une part, les surfaces utilisées par l'agriculture se sont réduites, d'autre part, elles se sont intensifiées sur les parcelles les plus favorables. Le système d'estive s'est transformé avec la création de grands parcs de pâturage et l'abandon de l'utilisation des jasseries, provoquant l'arrêt de l'irrigation et de la fertilisation des fumades. Une grande partie des terrains abandonnés par l'agriculture est aujourd'hui boisée, en raison d'une dynamique de recolonisation forestière des landes, mais surtout du développement de l'activité sylvicole dans les années 70. La plantation de plus de 300 hectares de résineux dans notre secteur d'étude a contribué au doublement des surfaces occupées par la forêt depuis 1960. Depuis une vingtaine d'années, de nouvelles pratiques agricoles, comme les labours et semis de prairies artificielles, se développent, menaçant la diversité du milieu. Les objectifs de cette étude s'articulent donc autour de deux axes :
- savoir quelles sont les variables physiques et/ou anthropiques qui peuvent expliquer la localisation des tourbières pour mieux comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes
- faire apparaître les clefs de l'organisation du paysage pour proposer des pistes de réflexion pour la gestion des Hautes Chaumes.

Nous présentons ici l'analyse de l'occupation du sol en 1962 comme état de référence avant les transformations de l'utilisation des Hautes Chaumes.

Aspect méthodologique

Nous avons choisi d'utiliser 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, 2001, 2002). Cette dernière s'appuie sur la théorie des systèmes discrets ou distribués et la théorie de l'information, et cherche à mettre en oeuvre le concept d'ordre - ou organisation - dans un paysage et à en donner une mesure. L'algorithme permet ainsi d'estimer la contribution d'un certain nombre de variables (explicatives) à l'organisation d'un espace, caractérisée par l'occupation du sol (variable cible). La théorie de l'information constitue la base théorique de la recherche de l'organisation. Elle permet à la fois de mesurer l'information contenue dans un paysage (complexité), c'est-à-dire l'information perçue par l'observateur, et d'apprécier les

échanges d'informations entre écosystèmes (messages allant d'une unité spatiale à une autre) ou du milieu abiotique au milieu biotique (Baudry et Burel 1985). Cette notion d'information permet à la fois une étude quantitative et globale sans nécessiter une connaissance fine des mécanismes de fonctionnement du paysage.

Pegase a déjà été éprouvé dans de nombreuses études portant sur des problématiques variées (Phipps 1981 ; Phipps *et al.* 1986a, 1986b ; Dumanski *et al.* 1987 ; Davis et Dozier 1990 ; Phipps *et al.* 1994 ; Casado *et al.* 1997 ; Lundström-Gilliéron 1999 ; Ernoult *et al.* 2003 ; Lundström-Gilliéron et Schlaepfer 2003 ; Mazagol 2006 ; Mazagol et Porteret 2006). Dans le cadre de notre utilisation de Pegase, l'espace étudié est caractérisé par un système cellulaire. Chaque unité spatiale (chaque cellule) est caractérisée par des descripteurs biotiques, abiotiques ou autres qui lui sont associés. Pegase est donc un algorithme divisif, hiérarchique et multivarié, dans lequel l'ensemble des unités est divisé progressivement par étapes (paliers) en sous-ensembles significatifs. Au cours du processus, les sous-ensembles sont de mieux en mieux définis par les variables explicatives (divisives). Palier après palier, PEGASE détermine quelle(s) variable(s), parmi les variables explicatives à disposition, permet(tent) de réduire l'entropie initiale au maximum, cette dernière étant estimée selon la formule de Shannon. Le paysage est découpé en zones qui rassemblent les unités où cette variable divisive prend la même valeur (Terminal subsets : TSS). Pour chaque zone, on aura une probabilité différente d'être en présence d'une certaine valeur de la variable cible. On introduit donc une contrainte dans le paysage, crée un ordre et réduit le nombre de configurations possibles de la variable cible. Le processus est répété jusqu'à l'obtention d'une division de l'espace selon une combinaison particulière des variables explicatives, combinaison qui représente la réduction maximum du nombre de configurations possibles.

En fin de processus, on a donc réduit l'entropie du système au maximum, en fonction d'une série de différents critères. Cette différence entre entropie initiale et entropie finale est appelée négentropie.

Trois critères de divisions peuvent être utilisés pour mener à bien la procédure divisive : l'information mutuelle (permettant de mesurer le lien entre la variable cible et la variable explicative introduit comme contrainte), le rapport de signification (calculé à partir du critère de Kullback) et l'information relative (expression relative de la négentropie).

Différentes indications doivent être fournies au processus et notamment les critères d'arrêt du processus : entropie et effectif minimaux des TSS. Mais l'algorithme s'arrête également si aucune des variables explicatives n'exerce de contraintes suffisamment significatives.

En fin d'application de l'algorithme, différentes métriques sont fournies : l'**entropie initiale**, l'**entropie finale**, la **négentropie**, la **contribution** de chaque variable à la négentropie et la **spécificité** montrant dans quelle mesure la présence d'une classe dans un TSS exclut celle des autres classes. Nous disposons enfin d'une **cartographie de l'état prédit** simulée à partir d'une matrice de probabilités d'occurrences de chaque classe de la variable cible dans chaque TSS. Une **matrice de succès** est également disponible. Elle indique la probabilité qu'une unité appartenant à une classe de la variable cible soit prédite comme appartenant à une autre et montre de ce fait les probabilités de prédictions erronées.

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 de grande taille à partir de fichiers respectant le format d'échange ESRI ASCII Grid. Ainsi, tous les fichiers, quel que soit le logiciel utilisé pour le mettre en place, ont été exportés dans ce format. Les données sont de résolution 10 m. La base de données comprend une variable cible : « occupation du sol » et 21 variables explicatives (figure 2).

Résultats

Résultats généraux :

	1962
Entropie initiale	1,997
Entropie finale	0,283
Négentropie	1,714 (1,834)
Redondance	85,8% (91,8%)
Complexité	8,538 (9,21)

La redondance est de 85,8% (figure 1) : l'ensemble des contraintes exercées par les variables explicatives sélectionnées représente 85,8 % de l'entropie initiale. L'occupation du sol est très bien déterminée par les descripteurs sélectionnés. Il s'agit d'un score remarquable. Seul 14,2 % de la négentropie n'est expliquée par aucune des variables sélectionnées. Cela peut s'expliquer par l'absence de variables que nous n'aurions pas pris en compte ou tout simplement par le hasard.

Figure 10 : Résultats généraux de l'analyse Pegase

Les contributions :

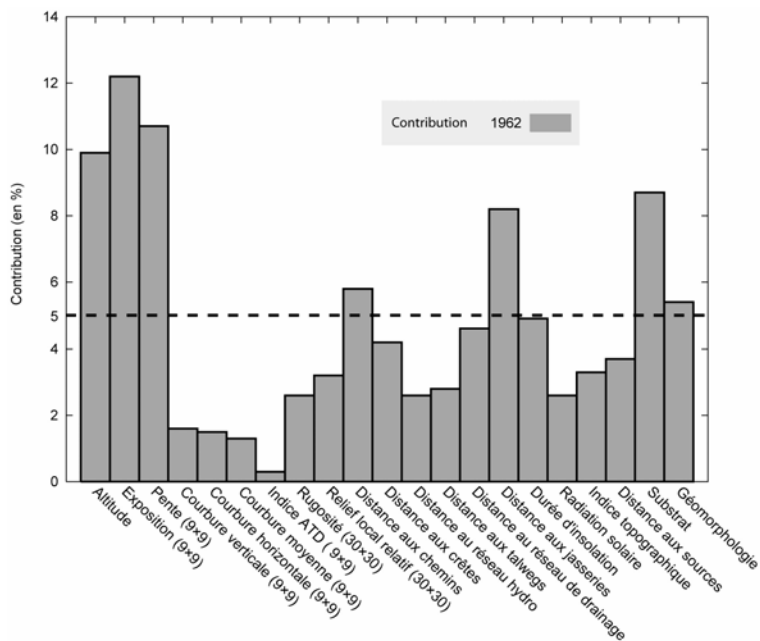


Figure 11 : Contribution des différentes variables explicatives

Différentes variables ont une influence que nous jugeons significative (dont la contribution est supérieure à 5 %) (figure 2). Il s'agit essentiellement de l'altitude, l'exposition, la pente, le substrat, la géomorphologie). Nous y ajoutons deux variables anthropiques : les distances aux chemins et aux jasseries. Cependant, il est important de s'interroger sur la signification réelle de ces deux variables. En effet, la localisation tant des jasseries que des chemins n'est pas le fruit du hasard et dépendent elles même fortement des conditions physiques. Nous reviendrons sur ce point un peu plus loin.

Les spécificités :

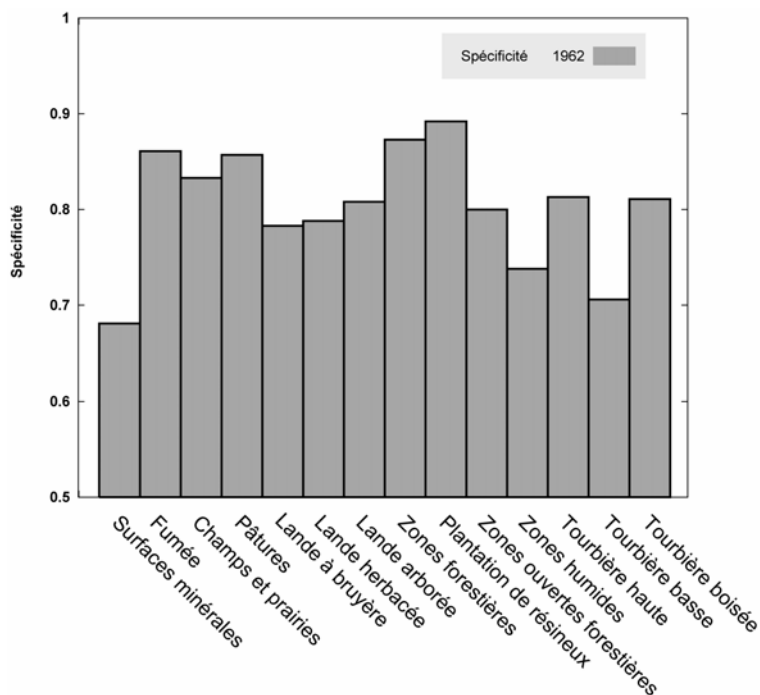


Figure 12 : Spécificité environnementale de chaque classe de la variable cible

Les spécificités (figure 3) correspondent à la dépendance plus ou moins importante des classes de l'occupation du sol vis-à-vis des combinaisons de variables cibles. Les classes à spécificité élevée sont fortement dépendantes de certaines conditions. Les autres sont plutôt ubiquistes. Dans notre cas, toutes les valeurs sont relativement élevées. Seules quelques classes possèdent des spécificités très inférieures à 0,8. Il s'agit soit de types d'occupation du sol qui traduisent des états de surfaces variés (surfaces minérales), soit de classes nécessitant des conditions locales que la précision de nos données ne permet pas d'exprimer (zones humides).

La matrice de succès :

Elle indique la probabilité qu'une unité appartenant effectivement à une classe de végétation soit prédite comme appartenant à cette classe.

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	30	28		20										
2		87												
3		17	68											
4				84										
5					88									
6				13	79									
7				11		76								
8							88							
9								81						
10			26				32		42					
11				16						63				
12											79			
13				11							19	58		
14														67

Figure 13 : Matrice de succès sans regroupement

V1 : Surfaces minérales ; V2 : Fumée ; V3 : Champs et prairies ; V4 : Pâtures ; VE5 : Lande à bruyère ; V6 : Lande herbacée ; V7 : Lande arborée ; V8 : Zones forestières ; V9 : Plantation de résineux ; V10 : Zones ouvertes forestières ; V11 : Zones humides ; V12 : Tourbière haute ; V13 : Tourbière basse ; V14 : Tourbière boisée

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). Il est possible de procéder au sein de cette matrice à des regroupements de classes en fonction des liens existants entre ces dernières et de corriger les succès de prédictions au sein de chacun d'eux. On note deux types de confusions :

- les confusions intra-groupes synonymes de classes proches (par exemple, « surface minérale / champs labourés » ou une coupe à blanc (espace ouvert) au sein d'un complexe de résineux)
- les confusions inter-groupes qui peuvent avoir deux origines distinctes. Soit ces confusions sont liées à des ressemblances physiologiques au cours de la mise en place de la cartographie d'origine par photo-interprétation ou télédétection. Soit elles traduisent la mise en évidence de dynamiques spatiales au sein du terrain d'étude (certaines classes mutent et les combinaisons qui leurs sont associées sont proches de celles associées à d'autres classes)

Conclusion

Nous avons obtenu une bonne modélisation de l'organisation du terrain d'étude : 85.8% de cette dernière ont été soulevés par les variables sélectionnés. On note l'importance des variables physiques dans l'organisation du paysage. Cependant, il est nécessaire, à ce niveau, d'indiquer que nous sommes conscients de la nature fortement anthropisée du paysage des Hautes Chaumes. La prévalence de ces variables physiques doit donc être soumise à discussion. Deux raisons nous semblent pouvoir être avancées. Tout d'abord, la mise en place des activités anthropiques est inhérente aux conditions physiques du milieu considéré. Ainsi, il est possible que la contribution des variables anthropiques soit masquée par certaines variables physiques. En effet, d'autres utilisations de Pegase, sur la totalité des Hautes Chaumes, ont mis en avant l'importance de l'activité agropastorale (Mazagol 2006). Cette dernière est cependant trop homogène à l'échelle de plus petites zones telles que celle étudiée ci-dessus.

D'autre part, la mise en évidence de confusions, notamment entre types d'occupation du sol proches, permet d'initier une réflexion quant à la qualité de la cartographie de végétation et l'existence de dynamiques au

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	78													
2		87												
3			85											
4				84										
5					88									
6						92								
7							87							
8								88						
9									81					
10				26						74				
11					16						63			
12												79		
13							11						77	
14														67

Figure 14 : Matrice de succès après regroupement : respectivement groupes « urbains et agricoles », « landes », « forêts », « zones humides »

sein du terrain d'étude. Cependant, ce dernier point devra être associé à une comparaison avec d'autres dates, telle que 2001 par exemple (Mazagol et Porteret 2006).

Enfin, il nous faut noter l'intérêt de l'utilisation de Pegase dans un contexte multiéchelle (Mazagol 2006). En effet, il apparaît qu'un certain nombre de variables explicatives écartées ici (dont la contribution est inférieure à 5%) peuvent agir à d'autres résolutions et à d'autres étendues. Ces deux points derniers feront prochainement l'objet d'un article.

Bibliographie

- Casado M. A., Ramirez-Sanz L., de Miguel J. M., de Pablo C. L.** (1997). An objective method for partitioning dendrograms based on entropy parameters. *Plant Ecology*. 131 ; 2. 193-197.
- 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. 750 p.
- 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.
- Ernoult A., Bureau F., Poudevigne I.** (2003). Patterns of organisation in changing landscapes : implications for the management of biodiversity. *Landscape Ecology*. 18 ; 3. 239-251.
- Etlicher B.** (1990). Le Forez : une montagne ? In **Université Jean Monnet** (Eds) *Les Monts du Forez : le milieu et les hommes*. 17-34.
- 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-Etienne, 159 p.
- 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. Thèse. 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.** (2005). XLPEG : Outil de mise en place d'entêtes de bases de données Pegase.
- Mazagol P.-O.** (2006). Recherche de variables contribuant à l'organisation d'un paysage de moyenne montagne. Thèse de doctorat de 3ème cycle. Université Jean Monnet. 302 p.
- 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.
- Mazagol P.-O., Porteret J.** (2006). 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"*, Chilhac.
- Phipps M.** (1981). Entropy and community pattern analysis. *Journal of theoretical biology*. 93. 253-273.
- Phipps M.** (2001). Espace, entropie, environnement. *5èmes Rencontres de Théo Quant : Nouvelles approches en géographie théorique et quantitative*, Université de Franche-Comté, Besançon. 13.
- 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.
- 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.