

**DYNAMIQUE DU PAYSAGE RURAL DE LA PARTIE
NORD-ouest DE LA SUISSE.
UNE ANALYSE POUR COMPRENDRE LA VARIATION DES
POPULATIONS DU LIÈVRE BRUN (LEPUS EUROPAEUS)**

THÈSE N° 2558 (2002)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENAC SECTION DE GÉNIE RURAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Corinne LUNDSTRÖM (-GILLIÉRON)

ingénieur du génie rural diplômée EPF
de nationalité suisse et originaire de Puidoux et Servion (VD)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. R. Schlaepfer, directeur de thèse
Dr H.P. Pfister, rapporteur
Prof. M. Phipps, rapporteur
Prof. J.-L. Scartezzini, rapporteur

Lausanne, EPFL
2002

Remerciements

Monsieur Daniel Bohnenblust, de l'Office fédéral de statistique, pour son excellent service. Thomas Czaka, de l'Office fédéral de topographie, pour m'avoir évité de devoir travailler moi-même des photos aériennes. Marianne Gfeller, Sara Poncet, Sven Bolomey, étudiants en génie rural, pour leur collaboration. Monsieur le Professeur Helbling, sans qui l'ACP serait encore et toujours un trop grand mystère. Fred Hutson, mon correcteur d'anglais « virtuel ». Messieurs Michel Kammermann, Marc Gindraux, Thierry Nippel et Hans-Ulrich Zaugg de l'OFS, pour leur appréciation constructive, bien que, par ma faute, très tardive. Evelyne Marandin et Gilles Mulhauser, du SRVA, ainsi que Monsieur le Professeur Nicolas Perrin, pour m'avoir donné des pistes. Monsieur Dr Hans Peter Pfister, de la Station ornithologique suisse de Sempach, de m'avoir fait confiance, et d'avoir généreusement financé une grande partie de ma thèse. Jenny et Michel Phipps, tout particulièrement, pour leur accueil exceptionnel à Ottawa. Monsieur le Professeur Michel Phipps, encore, pour son appui scientifique et son entrain communicatif. Monsieur Albert Pralong, pour sa relecture attentive et critique, à l'affût de la moindre imperfection stylistique. Martine Rebetez, pour son aide très appréciable. Monsieur le Professeur Jean-Louis Scartezzini, pour son intérêt et ses remarques pertinentes. Monsieur le Professeur Rodolphe Schlaepfer, pour son positivisme à toute épreuve, sa disponibilité et son encadrement sans faille. Le Centre de conservation de la faune et de la nature de l'Etat de Vaud, pour sa participation indirecte au financement de ce travail. Les collègues du GECOS, surtout Natalia Hasler-Pointet pour son aide inestimable en tous genres et à toute heure, Ion Iorgulescu pour ses critiques constructives, ainsi que David Pennington pour ses conseils en anglais. Le laboratoire de Photogrammétrie, en particulier Monsieur le Professeur Kölbl ainsi que Julien Vallet pour leur appui logistique. Le laboratoire de SIRS, en particulier Marc Riedo pour son aide essentielle avec les SIG. Les collaborateurs de la Station ornithologique suisse de Sempach, en particulier Simon Birrer, Otto Holzgang, Mathias Kestenholz, Lukas Kohli, Christian Marfurt, Gabrielle Peter Hilke, et tous les autres pour leur appui scientifique et l'excellent accueil qu'ils m'ont tous toujours réservé lors de mes visites à Sempach. Finalement, les membres du jury de thèse, pour leur patience et leur compréhension, lorsqu'ils recevaient pour la troisième fois un e-mail sans l'annexe annoncée, ou pour la quatrième fois une nouvelle version d'un chapitre « à lire, vite... ». Et bien sur tous les autres aussi.

Version abrégée

Depuis les années '50, le lièvre brun (*Lepus europaeus*) a régressé de façon inquiétante, en Suisse comme dans d'autre pays en Europe. Selon la Station ornithologique suisse de Sempach, cet animal est un bon indicateur de l'état du paysage, et sa régression est due en grande partie à l'essor de l'agriculture intensive, à l'extension de l'urbanisation et au développement des réseaux de transports (Pfister et al., 2002). Aujourd'hui, il est sur la Liste rouge des espèces à protéger.

Le but de cette recherche est d'analyser 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. Il s'agit, en particulier, d'identifier les facteurs du paysage déterminants pour cet animal, de déterminer leur tendance d'évolution, et finalement d'émettre des hypothèses sur les tendances d'évolution pour les années à venir et leurs conséquences sur les populations de lièvres.

A chaque décennie, 936 communes ont été décrites à l'aide de 40 variables, descriptives des pratiques agricoles, de l'utilisation du sol, de l'urbanisation, du climat, de la morphologie et de la géographie, formant une base de données que nous avons appelée « Paysage ». Ces données, provenant essentiellement de statistiques communales, se sont révélées être adéquates pour un suivi à une large échelle spatiale de l'état du paysage à travers sa composition.

Le contenu, la qualité et l'organisation de cette base de données « Paysage » ont été étudiés par des méthodes statistiques descriptives (distribution des données, histogrammes et boxplots à chaque décennie, dynamique des valeurs statistiques caractéristiques), ainsi que par une analyse en composantes principales (ACP). Cette dernière révèle l'existence de deux groupes de communes selon la première composante principale : urbaines (ou appartenant à une agglomération) et rurales. Elle montre également une évolution moyenne marquée, entre les années '50 et '90, du caractère urbain des deux groupes. Les trois premières composantes principales de l'ACP expliquent seulement environ 45% de la variance. Pour cette raison, nous avons préféré ne pas simplifier notre base de données en remplaçant nos variables par ces nouvelles variables composées, car la perte d'information aurait été trop importante.

Parmi les 40 variables, 16 variables clés pour le lièvre ont été identifiées. Pour cela, un « Indice d'abondance de lièvres » a été calculé sur un sous-échantillon de 125 communes, défini comme le nombre moyen de lièvres tirés à la chasse par unité de surface communale entre 1980 et 1985. La relation entre cet indice et les 40 variables du paysage, décrivant l'état des 125 communes dans les années '80, a été analysée avec l'aide des méthodes de corrélation, de régression multiple, de la méthode Pegase (une procédure divisive hiérarchique multivariée, basée sur la théorie de l'information (Phipps, 1981)), ainsi que des informations données par la Station ornithologique suisse de Sempach. Ces méthodes se sont révélées être complémentaires et nous ont permis de tenir compte de différents points de vue et de conserver une vision large du problème. Il serait tout de même extrêmement intéressant d'avoir la possibilité de calculer cet indice de lièvre sur un grand nombre de communes, afin d'assurer un fonctionnement optimal de Pegase.

Les tendances majeures d'évolution de ces variables clés, observées sur les 936 communes depuis les années '50 jusqu'aux années '90 sont les suivantes : 1. Diminution de la part de la surface agricole utile (SAU) dans l'utilisation du sol ; 2. Intensification des pratiques agricoles, augmentation des tailles des parcelles, changements de types de cultures ; 3. Urbanisation et augmentation du trafic privé ; 4. Légère augmentation de la pluviométrie.

Deux scénarios d'évolution du paysage pour les années à venir ont été définis. En considérant que les tendances que nous avons identifiées se prolongent (Scénario A), la situation pour le lièvre deviendra rapidement critique : la lente diminution de la SAU continuera à exercer une pression sur l'habitat potentiel du lièvre ; la forte augmentation des surfaces de routes et voies de chemin de fer réduira encore plus l'habitat du lièvre, et, surtout, fragmentera de plus en plus le paysage, morcelant son habitat, et créant des barrières souvent infranchissables pour l'animal ; l'accroissement du nombre de voitures extrêmement rapide, entraînant un nombre toujours plus important de lièvres tués chaque année sur les routes ; l'augmentation de la mécanisation des pratiques agricoles, révélée par l'agrandissement des parcelles, la diminution de la main-d'œuvre et une légère augmentation du nombre de tracteurs, des causes de diminution importante de la qualité de l'habitat du lièvre. Il est probable que l'augmentation de la pluviométrie, bien que peu significative, ne facilite pas la situation pour le lièvre, qui n'apprécie guère les champs trop humides. Par contre, la stabilisation des surfaces cultivées en maïs et la diminution des subventions AF, peu à peu « remplacées » par des subventions encourageant les pratiques agricoles extensives, agiraient en faveur du lièvre. Ce scénario correspond à la situation où la gestion du territoire ne serait pas adaptée en fonction des nouvelles contraintes et besoins apparaissant avec le temps. Pour tenir compte de ce dernier point, un deuxième scénario (B), plus nuancé, a été défini, basé sur les tendances pour le futur discutées dans le projet de réforme agricole par l'Office fédéral de l'agriculture, dans l'avant-projet de modification de la loi vaudoise sur l'aménagement du territoire et des constructions, et dans le suivi de la statistique suisse de la superficie par l'Office fédéral de statistiques. Les deux scénarios mènent à un bilan relativement pessimiste : pour plus de la moitié des variables clés intégrées dans les deux scénarios, l'évolution prévue a des conséquences négatives sur les populations de lièvres.

Cette espèce animale ayant été reconnue comme un bon indicateur de l'état du paysage par Pfister et al. (2002), nous recommandons de tenir compte des besoins de cette espèce animale dans la gestion future du territoire. Selon nos résultats, il est essentiel : 1. D'encourager des pratiques agricoles extensives ; 2. De freiner, voir arrêter l'extension des zones urbaines et des réseaux de transports ; 3. De réduire le trafic motorisé. Comme ces deux dernières recommandations semblent quelque peu irréalisables dans un futur proche, nous proposons de densifier le réseau de structures favorables pour le lièvre, tel les bandes herbeuses, les haies, les friches, et autres surfaces proches de l'état naturel, voire de créer des zones de protection pour le lièvre. En même temps, il s'agit d'élaborer un dispositif d'observation qui inclut un protocole de récolte des données menant à une base de données adéquate, et qui permet de contrôler les résultats des différentes mesures prises en faveur de cet animal.

Ces mesures permettront d'assurer le développement sain de la population du lièvre, et par la même occasion, un développement durable de nos ressources et du patrimoine.

Summary

Since the 1950s, the population of the Brown hare (*Lepus europaeus*) has dramatically decreased in Switzerland as well as in other European countries. According to the Swiss Ornithological Institute of Sempach, this animal is an adequate indicator of the state of the landscape. Its decrease is probably due to intensification of agricultural practices, extension of urbanism and development of transport networks (Pfister et al., 2002). Today, the Brown hare is on the Swiss Red list of species that must be protected.

This thesis presents an analysis of the landscape dynamics of the North-Western part of Switzerland, from the 1950s to the 1990s, through an historical analysis of the state of the landscape as it is perceived by the hare. In particular, we identify the factors of the landscape that are relevant for this animal, determine their trend of evolution, and finally postulate hypotheses for the evolution over the next years and their consequences for the hare populations.

For each decade, 936 communes are described, using 40 variables related to agricultural practices, land-use, morphology, urbanisation, climate and geography. This database is called “Landscape”. These data, mainly extracted from communal statistics, were found to be adequate to describe the evolution of the composition of the landscape at a large scale.

We studied the content, the quality and the organisation of this database “Landscape” with the help of descriptive statistical methods (data distribution, histograms and boxplots at each decade, dynamics of the statistical characteristic values) and using principal components analysis (PCA). The latter reveals two groups of communes: urban (belonging to an agglomeration) and rural. On average, it also shows a very definite evolution of the urban character of both groups, from the 1950s to the 1990s. The three first components of the PCA explain only 45% of the variance. Therefore, we decided not to simplify the database by replacing our variables by these agglomerated variables, as the loss of information would be important.

Among the 40 variables, 16 key-variables for the hare were identified. For this, an “Index of abundance of hares” was calculated for a sub-set of 125 communes, defined as the mean number of hares hunted per total communal area between 1980 and 1985. The link between this index and the 40 variables, describing the state of 125 communes in the 1980s, was analysed with the use of correlation, linear multiple regression, the method Pegase (a multivariate hierarchical divisive procedure, based on information theory (Phipps, 1981)), and additional information from the Swiss Ornithological Institute of Sempach. These methods were found to be complementary and their use enables us to take into account several perspectives. It would be interesting to go further by calculating this index for a larger number of communes in order to optimise the use of Pegase.

The main trends of evolution of these key-variables, observed on the 936 communes, between the 1950s and the 1990s, are: 1. Decrease in the fraction of agricultural area; 2. Intensification of agricultural practices, increase in the mean ownership unit area (mean parcel size), changes of the type of agriculture; 3. Urbanisation and increased private car use; 4. Slight increase in rainfall.

Two scenarios of evolution of the landscape for the next years are defined. Presuming that the identified trends will continue (Scenario A), the situation of the population of the hare will rapidly become critical: 1. The slow decrease in agricultural area will induce a pressure on the potential habitat of the hare; 2. The strong increase in areas of road/rail will reduce the habitat of the hare and most of all induce a fragmentation of the landscape, as well as barriers that are often impassable for the hare; 3. The extremely rapid increase in the number of cars will lead to an increase in road kill; 4. The increase in mechanisation in the agricultural practices, shown by the increase in the mean parcel size, the decrease in the working force and the slight increase in the number of tractors, are three reasons of important disturbance of the hare's habitat. In addition, the increasing rainfall, even if small, makes it probably more difficult for the animal, as it doesn't appreciate wet soils. On the other hand, in case the areas with corn stay relatively stable, and the grants for land improvement keep on decreasing, gradually "replaced" by grants encouraging extensive agricultural practices like direct grants for ecological compensation measure, the situation of the hare could stop getting worse. This scenario corresponds to a management of the territory that would not take into account new constraints and needs appearing with time. In order to take this into account, a second scenario (B) is defined, which is less extreme. It is based on trends for the future discussed by the Federal Agency for Agriculture, in the proposal for a modification of the law in the canton Vaud on country planning and buildings, and in the monitoring of Swiss statistics of the country. Both scenarios are rather pessimistic: for more than half of the key-variables integrated in both scenarios, the evolution probably leads to a negative situation for the hare.

As this species is a good indicator of the quality of the landscape (Pfister et al., 2002), we recommend to take into account the needs for this species in the future management of the territory. According to our results, it would be important for the hare population to remain stable or even increase: 1. To encourage extensive agricultural practices; 2. To slow down, or better stop, the extension of urban areas and road/rail networks; 3. To reduce private car use. As these two last recommendations seem quite unrealisable in the near future, we propose to extend the network of favourable structures for the hare: hedges, fallow land and other areas close to natural state. At the same time, a plan of observation has to be developed, in order to control the results of these measures. These measures would enable sustainable growth of hare population, and, at the same time, sustainable management of resources and our patrimony.

Table des matières

Chapitre 1: Introduction

1.1	Cadre de la recherche	2
1.2	But.....	3
1.3	Organisation et contenu du rapport	4

Chapitre 2: Etat des connaissances

2.1	L'écologie du paysage	10
2.2	Le paysage	12
2.3	La dynamique du paysage	16
2.3.1	La description d'un état et d'un changement d'état	16
2.3.1.1	Généralités	16
2.3.1.2	Outils	17
2.3.1.3	La surveillance du paysage en Suisse.....	17
2.3.2	Les processus.....	18
2.3.3	Les facteurs d'influence.....	23
2.3.4	La modélisation.....	25
2.3.4.1	Le modèle comme instrument scientifique	25
2.3.4.2	Le modèle comme outil de gestion	26
2.3.4.3	Caractéristiques des modèles	26
2.3.4.4	Les apports de la modélisation du paysage	27
2.4	Le lièvre brun.....	28
	<i>L'habitat et les besoins du lièvre.....</i>	<i>28</i>
	<i>La situation du lièvre en Suisse et dans différents pays d'Europe</i>	<i>30</i>
	<i>Etat de la recherche visant à identifier les facteurs d'influence des populations de lièvres</i>	<i>32</i>
2.5	Conclusion.....	33

Chapitre 3: Objectifs.....35

Chapitre 4: Base de données « Paysage »

4.1	Méthode: Récolte des données.....	38
4.1.1	Cadre spatio-temporel.....	38
4.1.1.1	Période d'étude.....	38
4.1.1.2	Zone d'étude.....	39
4.1.1.3	Unité spatiale	40
4.1.1.4	Echantillon	41
4.1.2	Sources des données.....	43
4.1.3	Variables « Paysage »	44
4.1.3.1	Choix des variables.....	44
4.1.3.2	Variables primaires	45
4.1.3.3	Variables rapportées	50
4.1.3.4	Estimation des valeurs manquantes	51

4.1.3.5	Etude préliminaire des variables	53
4.2	Résultats	54
4.3	Discussion et conclusion	54
Chapitre 5: Etude préliminaire du paysage et de sa dynamique		
5.1	Méthode	58
5.1.1	Méthodes statistiques descriptives	58
	<i>Histogrammes et boxplots</i>	58
	<i>Graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane</i>	59
	<i>Graphique d'évolution des valeurs de 30 communes-exemple</i>	59
	<i>Histogramme</i>	59
	<i>Boxplot</i>	60
	<i>Graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane</i>	60
	<i>Caractéristiques principales</i>	60
5.1.2	Carte de distribution spatiale	62
5.1.3	Analyse en Composantes Principales (ACP)	63
5.2	Résultats et discussions	64
5.2.1	Caractéristiques principales et distribution géographique des variables	64
5.2.1.1	Résultats	64
5.2.1.2	Discussion	64
	<i>Base de données « Paysage »</i>	64
	<i>La dynamique du paysage</i>	65
	<i>Distribution spatiale</i>	70
	<i>Variables rapportées à la surface communale ou aux surfaces concernées (SAU, TO, SAU-TO)?</i>	71
5.2.2	Analyse en Composantes Principales (ACP)	72
5.2.2.1	Résultat	72
	<i>La caractéristique urbaine cachée derrière la première composante principale C1</i>	73
	<i>Dynamique de la caractéristique urbaine</i>	77
	<i>Les facteurs « écologiques » cachés derrière les composantes principales C2 et C3</i>	80
5.2.2.2	Discussion	80
5.3	Conclusion	81
Chapitre 6: Le lièvre et le paysage		
6.1	Méthodes	86
6.1.1	Base de données « Lièvre »	86
6.1.1.1	Variables	86
	<i>Indice d'abondance de lièvres</i>	86
6.1.1.2	Sous-échantillon « Lièvre » et période d'étude	87
6.1.2	Pegase	88
	<i>Procédure</i>	89
	<i>Les critères de Pegase</i>	91
	<i>Validation</i>	91
6.1.3	Etude de la relation « Lièvre-Paysage »	92
6.1.3.1	Avec Pegase	92
6.1.3.2	Par des méthodes d'étude des dépendances	93
	<i>Corrélations</i>	93

	<i>Régression multiple linéaire</i>	93
6.2	Résultats	94
6.2.1	Caractéristiques principales de la variable « Indice d'abondance de lièvres »	94
6.2.2	Etude de la relation entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables Paysage..	95
6.2.2.1	Pegase	95
	<i>Réduction de l'entropie</i>	95
	<i>Les variables divisives sélectionnées</i>	96
	<i>Analyse de la composition des sous-échantillons IL1 et IL2</i>	98
	<i>Les critères de Pegase</i>	101
6.2.2.2	Matrice des corrélations	101
6.2.2.3	Régression multiple entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables Paysage.....	102
6.3	Discussion	105
6.3.1	La variable « Indice d'abondance de lièvres »	105
6.3.2	Méthodes d'analyses.....	106
6.3.3	Signification des variables clés pour le lièvre	108
6.4	Conclusion.....	110
Chapitre 7: La dynamique du paysage en fonction des variables clés		
7.1	Méthode	116
7.1.1	Base de données « Paysage clé »	116
7.1.2	Analyse des variables clés	117
7.1.2.1	Analyses statistiques descriptives	117
7.1.2.2	Corrélations	117
7.2	Résultats et discussion	118
7.2.1	L'évolution du paysage selon les variables clés	118
7.2.1.1	Corrélations simples entre les variables.....	118
7.2.1.2	Dynamique et distribution spatiale	121
7.2.2	Le paysage suisse au futur.....	127
	<i>Scénario A : « Prolongation de l'évolution observée des valeurs moyennes »</i>	127
	<i>Scénario B : « Selon les prévisions liées à la réforme agricole et à l'aménagement du territoire »</i>	128
7.3	Conclusion.....	133
Chapitre 8: Conclusions et perspectives		
8.1	Réponses aux objectifs et perspectives.....	138
8.2	Que conclure de cette recherche ?.....	148
	Références bibliographiques.....	149
	Lexique et liste des abréviations.....	155
	Annexes.....	157

Liste des figures

- Fig.1.1 : Les zones d'habitats de lièvres sur lesquelles les lièvres ont été comptés entre 1991 et 1999 par la Station ornithologique Suisse de Sempach et notre zone d'étude.
- Fig.1.2 : Evolution du nombre de lièvres brun (*Lepus europaeus*) tirés à la chasse entre 1930 et 2000 en Suisse.
- Fig.1.3 : Les trois étapes de notre analyse de la dynamique du paysage.
- Fig.2.1 : Illustration du paysage vu comme un canal d'information entre l'espace abiotique et l'espace biotique, le chevauchement des deux cercles représentant la redondance entre les deux espaces et l'organisation spatiale écologique du paysage.
- Fig.2.2 : Principales utilisations du sol dans la partie Nord-Ouest de la Suisse dans les années '50 et leurs transformations.
- Fig.2.3 : Répartition des espèces de lièvres en Europe et en Suisse.
- Fig.4.1: La zone d'étude de 16'795 km² avec 2128 communes et l'échantillon « Paysage » de 7'988 km² avec 936 communes.
- Fig.4.2 : Les 5 régions divisant la Suisse selon l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et les cantons.
- Fig. 5.1 : 5 types de distribution de fréquence des variables : décroissante (I), étalée vers la droite (II), symétrique (III), étalée vers la gauche (IV), et croissante (V).
- Fig.5.2 : Projection des communes dans le plan défini par les deux premières composantes principales (C1,C2) des ACP (A).
- Fig.5.3 : a) Valeurs caractéristiques des coordonnées selon la première composante principale C1 des sous-échantillons Agg et Non-Agg. b) Evolution de ces mêmes moyennes et médianes entre '50 et '60 ainsi qu'entre '80 et '90.
- Fig.5.4 : Evolution de 15 communes-exemples dans le plan formé par les deux premières composantes principales, avec indication de l'appartenance ou non à une agglomération.
- Fig.6.1 : Les 125 communes du sous-échantillon « Lièvre », réparties sur 3 cantons (LU, BL, TG), avec l'indice d'abondance de lièvres en [nb/km²], réparti en 10 classes équidistantes (de même intervalles).
- Fig.6.2 : a) Dendrogramme illustrant les trois premiers paliers de la procédure de divisive hiérarchique multivariée de Pegase. b) Diminution de l'entropie du système avec la formation de TSS, selon une courbe exponentielle négative.
- Fig.6.3 : Matrice d'occurrence des communes par TSS et par classe de la variable cible.
- Fig.6.4 : Histogramme, boxplot et valeurs caractéristiques de la variable « Indice d'abondance de lièvres ».
- Fig.6.5 : Variables divisives utilisées par Pegase lorsque la variable cible est discrétisée en 2 classes : a) Dendrogramme de la division; b) Matrice d'occurrence des communes par TSS et par classe de la variable cible « Indice d'abondance de lièvres ». ; c) les variables divisives et leur contribution à la réduction de l'entropie.
- Fig.6.6 : Distribution spatiale des communes selon : a) l'état de l'Indice d'abondance de lièvres ; et selon l'état des variables dont les valeurs moyennes sur les deux sous-échantillons IL1 et IL2 sont significativement différentes : b) « Vache/(SAU-TO) » ; c) « Vache/SAU » ; d) « SubventionAF/SAU e) « JoursT>5°C ».
- Fig.7.1 : Les 16 variables clés pour le lièvre identifiées au chapitre 6 et regroupées selon 6 types.
- Fig.7.2 : Evolution des moyennes des variables clés et évolution des médianes de « Maïs/SAU », « Tracteur/SAU » et « Voiture/SAU ».
- Fig.7.3 : Proportion des communes avec une évolution des variables clés négative (<0), nulle (=0) ou positive (>0) en %.

Figures des annexes :

Fig. A 4.5.1: Moyennes et écart type de la différence méthodologique ($90SAU_{OFS/GEOSTAT} - 90SAU_{OFS}$) et de l'évolution réelle ($90SAU_{OFS} - 80SAU_{OFS}$).

Fig. A 6.2.1: Système cellulaire (a) uniforme ou régulier et (b) irrégulier.

Fig. A 6.2.2. Différents cas de canal d'information.

Fig. A 6.2.3 : Dendogramme de la division hiérarchique.

Fig. A 6.2.4 : Chute d'entropie en fonction du nombre de TSS et courbe ajustée.

Fig. A 6.2.5 : Exemple de calcul de succès d'ordre 2.

Fig. A 6.2.6 : Représentation spatiale par Pegase de la variable cible (Communauté végétale) et d'une variable explicative (ici : Matériel pierreux).

Fig. A 6.2.7: Exemple d'analyse factorielle

Fig. A 6.2.8 : Etats de la variable cible: 1: réel observé ; 2 : simulé probable; 3 : simulé potentiel.

Fig. A 6.2.9 : Entropie résiduelle ou finale

Fig. A 6.3.1 : Spécificité (I) des classes de la variable cible.

Fig. A 6.3.2 : Répartition spatiale de la valeur calculée « Indice d'abondance de lièvres » à partir des données de la chasse en 1980 sur 125 communes. a) Valeurs distribuées selon 2 classes équiprobables ; b) Valeurs distribuées selon 8 classes équiprobables.

**Fig. A DV.1 : Nombre de jours annuels avec précipitation supérieure ou égale à 1mm, à la station pluviométrique de Neuchâtel. a) sur la période 1901-2000 ; b) sur la période 1901-1960.*

**Fig. A.DV.2 : Nombre de jours annuels avec $T_{moyenne}$ sur 24h supérieure à 5°C à la station climatologique de Neuchâtel. a) Valeurs calculées selon la méthode internationale; b) Valeurs calculées selon la méthode suisse.*

**Fig. A.DV.3 : Stations pluviométriques et climatiques.*

* Document « Description des variables », dans l'Annexe « Bd&Variables » (CD).

Liste des tableaux

- Tab.4.1 : Echantillon de la zone d'étude: Répartition des 936 communes et de leurs surfaces par canton.
- Tab.4.2 : Eléments digitalisés sur les 12 communes de LU et SG pas entièrement mesurées par les statistiques fédérales en 1952 et 1972.
- Tab.4.3 : 28 variables de 6 types.
- Tab.4.4 : Les 11 variables primaires (A) et les 29 variables rapportées à: (B) la surface communale totale (SC) ; (C) la surface agricole concernée : Surface agricole utile (SAU), Terre ouverte (TO) ou Surface agricole utile non terre ouverte (SAU-TO).
- Tab.5.1 : Résumé de quelques observations sur les décennies ('50, '60, '70, '80 et '90) tirées des fiches descriptives des variables (voir Annexe « Bd & Variables »).
- Tab.5.2 : Résumé de quelques observations sur les différences entre décennies ($\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$) tirées des fiches descriptives des variables (voir Annexe « Bd & Variables »).
- Tab.5.3 : Participation à l'explication de la variance totale des trois premières composantes (C1, C2 et C3) des ACP sur la base de données « Paysage ».
- Tab.5.4 : Poids des trois premières composantes C1, C2, C3 des ACP (A) aux quatre décennies ACP50, ACP60, ACP80 et ACP90.
- Tab.6.1 : Composition du sous-échantillon « Lièvre » : répartition des 125 communes par cantons.
- Tab.6.2 : Moyennes (\pm Ecart-type) des valeurs des variables retenues par Pegase comme variables divisives sur les deux sous-échantillons formés par les communes avec un indice de lièvres faible (IL1 : $N_1=63$) et les communes avec un indice de lièvres important (IL2 : $N_2=62$). La comparaison des moyennes est effectuée à l'aide du test t de Student.
- Tab.6.3 : Coefficient de corrélation r entre la variable « Indice d'abondance de lièvres » et les variables « Paysage ».
- Tab.6.4 : Matrice de corrélation des 11 variables dont les coefficients de corrélation sont peu élevés, en général inférieurs à 0.5 ($|r| < 0.5$) et de l'indice de lièvres (extrait de l'Annexe 6.4).
- Tab.6.5 : Variables fortement corrélées ($r \geq 0,5$), de façon simple, à l'une des deux variables sélectionnées par régression multiple (information extraites de la matrice de corrélation en Annexe 6.4).
- Tab.6.6 : Variables clés pour le lièvre, sélectionnées par les trois méthodes d'analyse de la base de données « Lièvre » et de la littérature, avec entre parenthèses le signe de la relation entre chaque variable et le lièvre.
- Tab.7.1 : Matrice de corrélation des 12 variables de la base de données "Paysage clé" à la décennie '80 et des différences avec la décennie suivante ($\Delta 80-90$).
- Tab.7.2 : Tendances pour le future exprimées dans les deux scénarios A et B décrits ci-dessus et évaluation qualitative de leurs impacts sur le lièvre.

Tableaux des annexes:

Tab. A 4.5.1: Comparaison des méthodes de relevés pour SAU et Surface agricole utile en 1980 et 1990. SAU_{OFS} : recensements fédéraux de l'agriculture et de l'horticulture effectués par l'OFS ; SAU_{OFS/GEOSTAT} : Statistique de la superficie de l'OFS distribuée par GEOSTAT.

Tab. A 6.2.1: Tableau des fréquences des TSS par classes de la variable cible.

Tab. A 6.3.1 : Les 29 variables, regroupées en 5 catégories d'influences sur le lièvre, adapté du Tab.4.3, chapitre 4 « Base de données paysage » .

Tab. A 6.3.2 : Comparaison des essais d'application de Pegase sur la base de données « Lièvres », avec différentes conditions de départ données par trois critères (D, R, O).

Tab. A 6.3.3 : Contribution à la néguentropie des variables divisives en % et par ordre d'apparition.

Chapitre 1

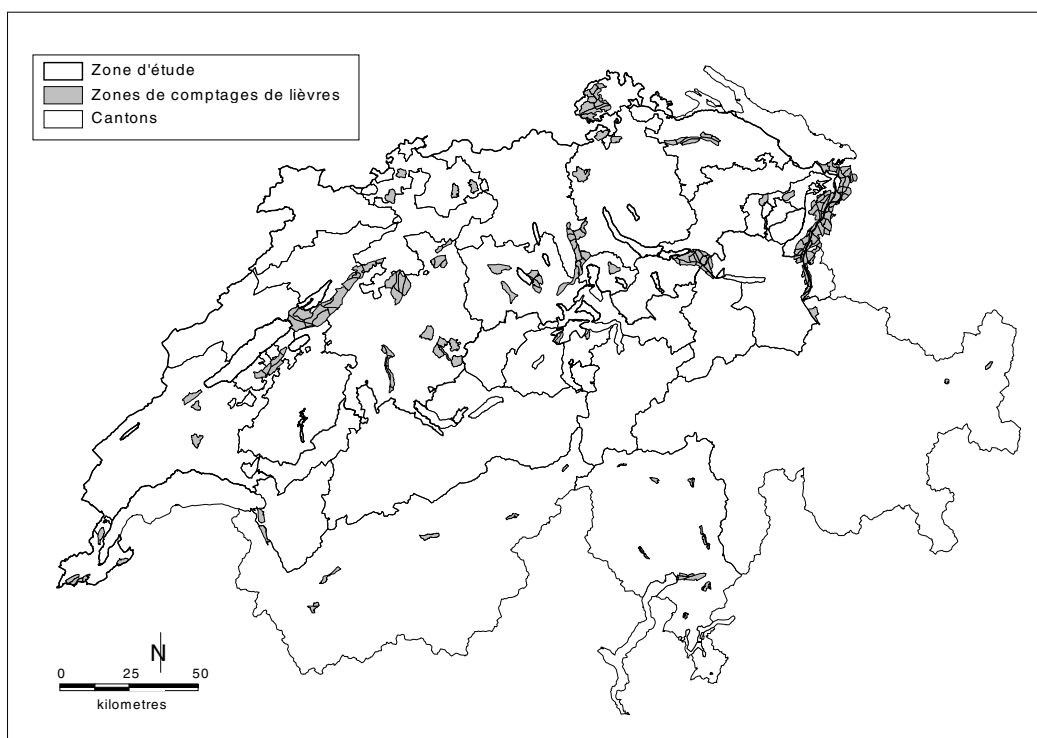
Introduction

Cette introduction doit permettre au lecteur de rapidement comprendre l'objet et le cadre de cette étude, ainsi que de trouver où se situe l'information qu'il recherche. Nous profitons aussi de clarifier la démarche générale de notre travail par un schéma représentant les différentes étapes. Nous terminons par une remarque concernant le domaine de validité des analyses statistiques effectuées, valable pour l'ensemble de notre étude.

1.1 Cadre de la recherche

Notre projet de recherche a été défini et effectué en collaboration avec la Station ornithologique suisse de Sempach, financé en partie par celle-ci dans le cadre de la campagne « Lièvre/Perdrix » (projet de l'OFEFP débuté en 1991). Dans ce même cadre, la Station ornithologique a conduit un projet de recherche : « Schweizerisches Felhasenprojekt 1991-1999 » (Pfister et al., 2002) dans le but de suivre l'évolution des populations de lièvres bruns en Suisse. Ce projet de la Station ornithologique vise, en particulier, à évaluer le succès de mesures de compensations écologiques mises en place dans des paysages agricoles ouverts, à identifier les relations entre l'état du paysage et l'état des populations de lièvres, et, finalement, à évaluer si la méthode développée dans ce projet, basée sur l'état du paysage à l'échelle du pays, est adéquate pour un monitoring des populations de lièvres bruns. Pour cela, un relevé des populations de lièvres a eu lieu deux fois par année au printemps, pendant 9 ans, sur 218 zones couvrant au total 1'478 km² (Fig.1.1).

Fig.1.1 : Les zones d'habitats de lièvres sur lesquelles les lièvres ont été comptés entre 1991 et 1999 par la Station ornithologique Suisse de Sempach et notre zone d'étude. (Fonds de carte : OFS GEOSTAT / S+T)

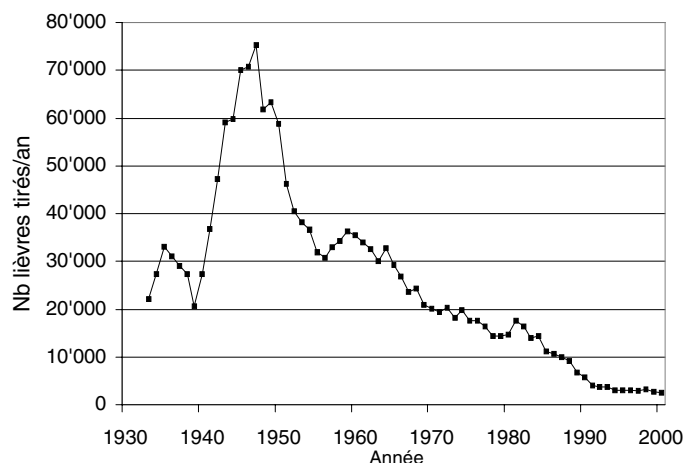


Mais les populations de lièvres dans les années '90 sont faibles, l'espèce figure, d'ailleurs, sur la Liste rouge des espèces à protéger (OFEFP, 1994). En admettant que la variation du tableau de chasse reproduise celle des populations réelles (Pfister et al., 2002), on constate qu'il n'en a pas toujours été ainsi, mais que l'espèce a commencé à régresser à la fin des années '40 déjà (Fig.1.2). En plus des multiples causes possibles de ce déclin évoquées par différents auteurs, (Salzmann-Wandeler (1976)

en Suisse, l'Office national de la chasse (1995) en France, Engelhardt et al. (1985) en Allemagne, Meriggi & Alieri (1987) en Italie), Pfister et al. (1998) citent en premier lieu l'essor de l'agriculture intensive, l'extension de l'urbanisation ainsi que le développement des réseaux de transports, constat que ces auteurs déduisent sur la base d'observations de populations de lièvres, telles que celles effectuées par (Pfister, 1984) ou (Pfister, 1989). La question qui découle de ces constats est la suivante :

« Est-il possible de vérifier l'hypothèse que l'intensification des pratiques agricoles, l'extension de l'urbanisation ainsi que le développement des réseaux de transports en Suisse ont été tels que les populations de lièvres ont régressé de la sorte entre 1950 et 1990 ? »

Fig. 1.2 : Evolution du nombre de lièvres brun (Lepus europaeus) tirés à la chasse entre 1930 et 2000 en Suisse. Jusqu'en 1952 : y compris les lièvres variables (Lepus timidus) tirés (source : statistiques fédérales de la chasse, OFEFP, www.wild.unizh.ch).



Pour répondre à cette question, nous nous sommes basés sur les résultats obtenus par la Station ornithologique. Nous avons effectué une analyse rétrospective du paysage jusqu'en 1950, à l'échelle de la Suisse. La zone d'étude correspond à la partie Nord-Ouest du pays et couvre l'essentiel de l'habitat potentiel du lièvre brun. Notre recherche vise donc à compléter celle menée par la Station ornithologique, en appréhendant le problème d'une autre façon : en observant le paysage de 936 communes, à travers les yeux de lièvre.

1.2 But

Le but de cette recherche est d'analyser la dynamique du paysage de la partie Nord-Ouest de la Suisse entre 1950 et 1990, au moyen d'une analyse historique de l'état du paysage dans les années '50, '60, '70, '80 et '90, tel qu'il est perçu par le lièvre brun. Il s'agit, en particulier : 1) d'identifier les facteurs du paysage déterminants pour le lièvre brun, parmi un jeu de variables décrivant l'utilisation du sol, les pratiques agricoles, l'urbanisation, le climat, la morphologie et la géographie ; 2) de déterminer leur tendance d'évolution ; 3) d'émettre des hypothèses sur les tendances d'évolution pour les années à venir et leurs conséquences sur les populations de lièvres.

1.3 Organisation et contenu du rapport

Ce rapport débute, avec le **chapitre 2**, par un état des connaissances portant sur l'écologie du paysage, sur le paysage lui-même, sur la dynamique du paysage et finalement sur le lièvre en Suisse. Nous tenterons par cette méthode de positionner notre recherche dans la multiplicité des notions que regroupent ces termes. Le but est de montrer que le sujet est vaste, qu'il a été déjà largement étudié, qu'un grand nombre de questions subsistent. Nous avons choisi de nous limiter à explorer certaines directions bien que d'autres aient probablement conduit à d'aussi riches découvertes.

Dans le **chapitre 3**, nous exposons les objectifs particuliers de notre recherche, établis non-seulement sur la base de la question à l'origine de ce travail, mais également en fonction des connaissances acquises et des questions soulevées par l'état des connaissances.

Les chapitres 4, 5, 6 et 7 contiennent les résultats que notre recherche a produit : des bases de données et leurs analyses. L'ensemble conduit à une analyse de la dynamique du paysage, menée en trois étapes (Fig.1.3) :

- Dans un premier temps (**chapitres 4 et 5**), nous avons rassemblé les informations dans une base de données « Paysage » : 40 variables « Paysage » décrivant l'état de 936 communes tel qu'il se présente dans les années '50, '60, '70, '80, et finalement '90. Ceci conduit à une vision d'ensemble de l'évolution du paysage de la partie Nord-Ouest de la Suisse. Les différents outils de présentation de ces données (histogrammes, boxplots, graphiques d'évolution et cartes) sont également des moyens de juger de la comparabilité des valeurs, donc de la possibilité d'utiliser ces valeurs, pour décrire la réalité. Comme un certain nombre d'informations se recoupent, rendant cette base de données plus lourde que nécessaire, nous avons cherché à réduire le nombre de variables par une Analyse en Composante Principale (ACP). Le résultat de cette ACP ne nous permet pas de remplacer les 40 variables de départ par des variables composées, correspondant aux premières composantes principales, comme il se fait habituellement, mais cette approche a tout de même permis de mettre en évidence le degré d'urbanisation des communes. Cette caractéristique urbaine est effectivement essentielle pour décrire le paysage et probablement également une des sources de forces motrices¹ sur la dynamique du paysage.
- Dans une deuxième étape (**chapitre 6**), nous nous sommes concentrés sur la décennie des années '80, époque à laquelle nous disposons de résultats de la chasse au lièvre suffisants : ils ont été relevés dans plusieurs cantons par zone de chasse affermée. Nous avons utilisé ces résultats pour calculer un « Indice d'abondance de lièvres » (IL) sur 125 communes parmi les 936 de départ. Cet indice, défini comme la densité de lièvres tirés à la chasse par unité de surface, est un 41-ième descripteur des 125 communes, après les 40 variables « Paysage ». Nous voilà donc en possession d'une deuxième base de données, appelée « Lièvre ». Nous avons alors analysé la relation entre cet indice de lièvres et les 40 variables « Paysage » par différentes méthodes, dont

¹ Traduction du terme anglais « Driving force ».

une méthode d'analyse Pegase² (Phipps, 1981), et des méthodes de dépendance (corrélation et régression multiple). Finalement, avec l'aide également d'informations tirées de la littérature, nous avons identifié les 16 variables clés pour le lièvre, c'est-à-dire les variables « Paysage » pour lesquelles il existe une relation avec l'indice de lièvres. Précisons que dans l'analyse de régression multiple et pour Pegase, l'indice de lièvre est la variable cible, alors que les variables « Paysage » sont les variables explicatives.

- Dans la dernière étape (**chapitre 7**), nous avons concentré notre recherche sur ces 16 variables clés pour le lièvre pour analyser la dynamique du paysage, mais, à nouveau, sur les 936 communes choisies dans la première étape. Nous voilà donc en présence d'une troisième base de données, appelée « Paysage clé », comprenant 16 variables, dont 12 sont essentielles et les autres redondantes, qui décrivent certains aspects clés du paysage pour le lièvre, de 936 communes. Le lièvre est indirectement inclus dans cette troisième base de données, au travers des variables clés, qui sont directement liées au lièvre. Nous avons alors cherché les interactions entre ces variables clés, ainsi qu'entre leur évolution, depuis les années '50, afin de comprendre certains mécanismes de la dynamique du paysage, qui pourraient avoir eu une influence sur les populations de lièvres. Finalement, nous avons défini deux scénarios d'évolution du paysage pour les années à venir et évalué leurs conséquences sur les populations de lièvres. Le premier scénario, basé uniquement sur l'observation des tendances d'évolution de nos variables clés, dessine un état extrême du paysage où la nature et le paysage rural jouent un rôle secondaire, scénario que personne ne souhaite voir se développer. Le deuxième, basé sur un certain nombre de tendances pour le futur, discutées dans le projet de réforme agricole par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG, 2000), dans l'avant-projet de modification de la loi vaudoise sur l'aménagement du territoire et des constructions (Biéler, 2001), et dans le suivi de la statistique suisse de la superficie par l'Office fédéral de statistiques (OFS, 2001), est moins extrême que notre premier scénario, mais sans pour autant rendre le bilan pour les populations de lièvres plus favorable.

Le **chapitre 8** fait la synthèse des conclusions que nous avons tirées à la fin de chaque chapitre, en répondant aux questions posées sous forme d'objectifs au chapitre 3. Dans ce chapitre, nous discutons également des questions restées sans réponses et des perspectives ouvertes par ce travail. Nous terminons en résumant brièvement les apports essentiels de notre recherche pour la science de l'écologie du paysage, ainsi que pour la mise en pratique de mesures touchant la protection du paysage et de la faune.

² Pegase : Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique, développé par M. Phipps, Département de Géographie, Université d'Ottawa, Ottawa, Canada.

Il nous reste à ajouter une précision importante, concernant les choix des communes de l'échantillon de 936 communes et du sous-échantillon de 125 communes, utilisées dans les trois bases de données « Paysage », « Lièvre », et « Paysage clé ». Cette synthèse facilitera la lecture de ce rapport et nous permet de justifier une fois pour tout le bien fondé et les limites des méthodes d'analyses statistiques utilisées :

- L'échantillon de 936 communes est non aléatoire. Les communes ont été sélectionnées de manière ciblée. Des 2'128 communes constituant la zone d'étude, nous avons retenu celles pour lesquelles nous avons pu rassembler des données pour l'ensemble des variables choisies et sur l'ensemble de la période d'étude. Ces communes couvrent 7'988km², c'est-à-dire 47% de la zone d'étude. 18 des 26 cantons suisses sont représentés, mais le nombre de communes et la surface échantillonnée varie beaucoup d'un canton à l'autre.

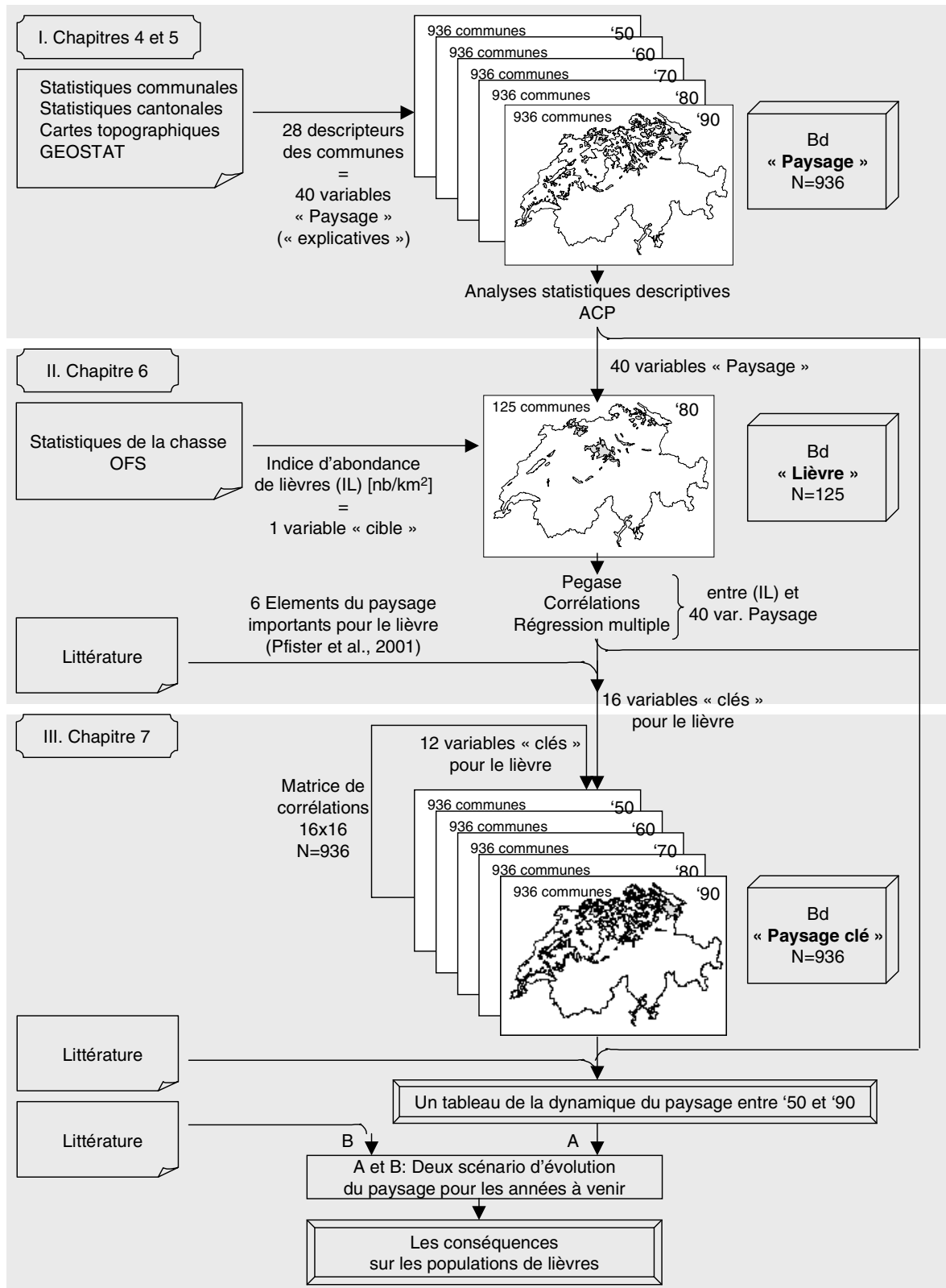
Le sous-échantillon de 125 communes est également non aléatoire. Les communes ont été sélectionnées de manière ciblée. Ce sont celles pour lesquelles il existe des données de chasse, par zones affermées, sur la période 1980-1985. Ces communes sont réparties sur trois cantons (LU, BL et TG) et couvrent 13% de l'échantillon « Paysage » en nombre de communes et en surface.

Cette construction ciblée des échantillons limite les analyses statistiques possibles.

- Le sous-échantillon de 125 communes n'est donc pas représentatif, au sens statistique du terme, de l'échantillon de 936 communes. Celui-ci n'est pas non plus représentatif, au sens statistique du terme, des 2'128 communes de la zones d'étude, ni des 2'983 communes de la Suisse. De ce fait, les résultats de nos analyses ne peuvent être extrapolés à d'autres communes sans précautions. Il s'agit dans cette recherche non pas de caractériser la dynamique du paysage sur l'ensemble du territoire du pays, mais d'utiliser au mieux les informations disponibles et d'analyser la dynamique du paysage sur la base de données aussi proches que possible de la réalité.

Terminons en précisant que les limites communales utilisées sont celles répertoriées en 1996 par le service GEOSTAT de l'Office Fédéral de la Statistique (OFS, 1993).

Fig.1.3 : Les trois étapes de notre analyse de la dynamique du paysage. La première étape correspond aux chapitres 4 et 5, la deuxième au chapitre 6, la dernière au chapitre 7. (Fonds de carte : OFS GEOSTAT / S+T)



Chapitre 2

Etat des connaissances

Les deux premières sections de ce chapitre s'inspirent entièrement de quelques excellentes revues bibliographiques, déjà existantes, concernant l'écologie du paysage et le paysage. Dans la troisième section, nous décrivons l'état et les changements du paysage, à différentes époques, durant le XX^e siècle en Suisse. Dans la quatrième section, nous exposons les connaissances actuelles sur le lièvre brun et quelques études existantes sur son comportement et les relations entre cet animal et les différents éléments du paysage.

Les informations rassemblées dans cet état des connaissances sont suffisantes pour donner une vue d'ensemble sur l'amplitude du sujet, bien qu'elles ne nous permettent pas d'être exhaustif. Nous mentionnons les concepts que nous utiliserons dans notre recherche et donnons les raisons pour lesquelles nous avons orienté notre recherche dans les directions choisies.

2.1 L'écologie du paysage

L'écologie du paysage est une science jeune, même si ses racines sont à rechercher loin dans le temps, depuis que l'être humain vit dans les paysages (Forman & Godron, 1986). Elle n'a pas une définition unique. Troll a proposé ce terme « écologie du paysage » dans les années '30 et il l'a défini comme un domaine trans-disciplinaire, faisant le lien entre l'arrangement spatial des éléments du paysage observé (géographie physique) et les concepts d'écologie (Troll 1939, cité dans (Skanes, 1996)). Par la suite, l'écologie du paysage est devenue un domaine scientifique distinct, qui inclut un concept plus large que celui proposé par Troll et qui a été appréhendé de différentes façons :

- A. La première englobe le thème dans sa totalité et distingue trois perspectives (Farina, 1998) : 1. **Humaine** : le paysage est groupé en entités fonctionnelles qui ont une signification pour la vie humaine. 2. **Géo-botanique** : Il s'agit de la distribution spatiale des composantes biotiques et abiotiques de l'environnement, du paysage « sol », jusqu'au paysage perçu par la flore, et même jusqu'à la distribution d'entités floristiques, comme les communautés, les prairies, les bois, etc. Cette perspective inclut le climat, la géologie, la topographie, ainsi que les facteurs environnementaux qui résultent de leur interaction, tels que le sol, l'hydrologie et la végétation (Glenz, in press). L'impact, toujours croissant, des activités humaines accentue ces facteurs naturels. 3. **Faunistique** : Cette perspective est fondamentalement liée à la perspective humaine, mais elle s'en distingue par le fait que l'approche se fait à l'échelle spécifique à l'espèce animale considérée. En effet, le paysage ne sera pas perçu de la même façon par le lièvre brun que par un insecte ou un oiseau, étant donné que leurs besoins, domaines vitaux ou territoires ne sont pas les mêmes.

Ces trois perspectives utilisent le même espace ainsi que le même arrangement spatial des processus et des patrons¹, ce qui implique, obligatoirement, des interactions entre le monde humain et le monde des plantes et des animaux. La dimension humaine du paysage est probablement la plus complexe parce qu'elle est une superposition des composantes animales et culturelles de l'humanité.

- B. Selon la deuxième, l'écologie du paysage se concentre sur trois caractéristiques du paysage (Forman & Godron, 1986) : 1. La **structure** ou les relations spatiales entre les écosystèmes, c'est-à-dire la distribution d'énergie, de matière et d'espèces en relation avec la taille, la forme, le nombre, le type et la configuration des composants; 2. Le **fonctionnement** ou l'interaction entre les éléments spatiaux, c'est-à-dire les flux d'énergie, de matière et d'organismes; 3. Les **changements** dans la structure et dans la fonction de la mosaïque écologique dans le temps. Risser cité dans (Turner & Gardner, 1991) ajoute encore : 4. L'influence de l'hétérogénéité spatiale sur les processus biotiques et abiotiques ; 5. La gestion de l'hétérogénéité spatiale.

¹ Patron : traduction du terme anglais « pattern », selon (Burel & Baudry, 1999), décrivant l'arrangement spatial de la mosaïque et des réseaux.

Cette approche fait ressortir le fait que c'est la considération du patron du paysage qui distingue l'écologie du paysage des études traditionnelles en écologie.

- C. La troisième différencie trois approches, basées sur la façon de tenir compte de l'**espace** (Baudry & Burel, 1985) : 1. En incluant tous les phénomènes dans une région mais sans analyse de la structure spatiale (par exemple pour la gestion régionale ou les études écologiques) ; 2. En considérant l'écologie dans le paysage, tout en se concentrant sur une seule tache et sans considérer les propriétés du système en entier ; 3. En considérant l'écologie d'un paysage et en l'étudiant comme une unité spatialement structurée et continue.
- D. La quatrième approche met l'accent sur la perspective **horizontale**, c'est à dire sur les relations chorologiques² entre les unités spatiales, pour lesquelles les termes de taches³, corridors et mosaïques ont été introduits, et elle ajoute comme dimension **verticale** la distribution verticale dans l'espace des attributs du sol (atmosphère, climat, roche mère, topographie, sol, eau, végétation, faune, influence humaine). Alors que d'autres sciences, comme la géologie et les sciences de la terre, sélectionnent une strate à étudier et considèrent les autres comme des « facteurs de condition », l'écologie du paysage prend l'hétérogénéité verticale, formée par tous les attributs du sol, comme objet holistique d'étude. La chronologie temporelle permet d'ajouter une perspective rétrospective à cette dimension verticale. Le sujet principal de l'écologie du paysage est donc l'hétérogénéité dans l'ensemble de l'objet, aussi bien horizontale que verticale.
- E. Citons encore la définition de l'écologie du paysage donnée par l'IALE⁴. Selon cet organisme, actuellement un des plus actifs dans ce domaine, cette science étudie la **dynamique spatio-temporelle** des composantes biologiques, physiques et sociales des paysages humanisés et naturels. Elle englobe plusieurs disciplines telles que l'architecture du paysage, les sciences naturelles, la géographie et les sciences sociales. Les projets en matière d'écologie du paysage couvrent une large gamme de questions qui va de l'analyse des risques écologiques à l'étude de la biodiversité, en passant par le développement de stratégies de gestion et d'aménagement de l'espace socialement acceptable, et l'observation de l'attitude du publique face aux changements du paysage.
- F. Finalement, on peut différencier deux écoles (Forman & Godron, 1986) : l'**école européenne** qui lie, de façon très rapprochée, les sciences du sol, l'analyse de la végétation, la cartographie, la biologie et la géomorphologie et tente d'intégrer les sciences naturelles et les systèmes socio-économiques ; l'**école nord-américaine**, plus récente, qui s'est orientée vers l'écologie, l'architecture du paysage, la foresterie et la biologie de la faune sauvage et s'est penchée, en particulier, sur l'instrumentation et la modélisation, comme les modèles spatiaux, fractals et neurals, ainsi que la télédétection (Forman, 1990).

² L'aspect chorologique est donnée par un conglomérat d'unités d'attributs du sol ou de patrons de cartes, qui montrent l'hétérogénéité horizontale, le patron horizontal des éléments (unités de sol) mutuellement liés (Zonnerveld, 1990).

³ Traduction du terme anglais « patches », selon (Burel & Baudry, 1999), décrivant une unité fonctionnelle définie par sa taille, sa forme et sa nature, non-linéaire, relativement homogène et qui diffère des environs (Forman, 1995).

⁴ IALE : International Association for Landscape Ecology, organisme fondé en 1982.

Dans notre recherche, nous utilisons les approches suivantes de l'écologie du paysage :

- A. Décrire le paysage selon la perspective humaine de l'écologie du paysage. En effet, nous décrivons : 1. le paysage par son utilisation du sol, en particulier le taux de construction et le type d'exploitations agricoles des terres ; 2. les causes possibles de dynamique par les facteurs anthropiques. La perspective faunistique est également intégrée par le biais de l'addition de variables qui décrivent le paysage comme le lièvre brun le perçoit.
- B. Caractériser les changements de la structure de la mosaïque dans le temps, puisqu'il s'agit de décrire la dynamique du paysage.
- C. Etudier le paysage comme une unité spatialement structurée et continue. En effet, les communes formant les unités du paysage étudié sont des entités politiques, donc bien délimitées et réelles dans le territoire suisse. La zone d'étude est un paysage continu, dont nous décrivons un échantillon. Cette approche est adéquate pour l'utilisation du modèle Pegase (Phipps, 1981) présentée au chapitre 6 « Le lièvre et le paysage », et convient au but de notre étude qui est d'identifier chaque paysage comme une unité régionale. Cette différenciation est une des tâches importantes de l'écologie du paysage et passe par la sélection des caractéristiques appropriées (Zonnerveld, 1990). Ces caractéristiques serviront alors de base pour évaluer la valeur, la capacité ou la durabilité d'une certaine utilisation du sol, ainsi que les besoins pour la conservation et la restauration du paysage comme environnement pour l'homme.
- D. Différencier chaque paysage par la combinaison verticale des attributs du sol, gérée par un système d'information géographique (SIG) et analysée avec différentes méthodes statistiques et avec Pegase.
- E. Evaluer les stratégies de gestion et d'aménagement de l'espace, socialement acceptables et qui permettent le développement des populations de lièvres.
- F. Intégrer les sciences naturelles et les systèmes socio-économiques de l'école européenne ainsi que la modélisation et les techniques de SIG de l'école américaine.

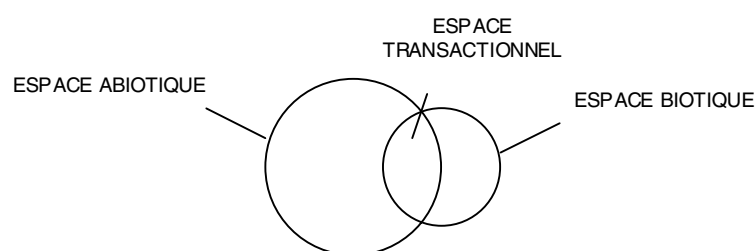
2.2 Le paysage

Le paysage est une notion qui existe depuis fort longtemps : le terme anglais "landscape" semble avoir dérivé du terme danois "Landschap", introduit par la peinture danoise du paysage (Landschappen). Les termes allemands et danois « Landschaft » et « Landschap », à l'origine une indication sur une surface quelque part dans l'espace, sont devenus une indication du caractère d'une surface en fonction de son contenu (Zonnerveld, 1990). Ainsi, au début du XIX^e siècle, le concept du paysage comprenait entre autres la fonction de maison pour l'Homme, définie par des paramètres culturels, économiques et physiques. Plus tard, durant la deuxième moitié du XX^e siècle, les questions touchant le paysage ont été catégorisées en deux groupes : géographie physique et géographie humaine, ce qui a conduit à une perte du caractère interdisciplinaire que ce domaine

revêtait auparavant. Mais les études sur le paysage nécessitent un aspect d'intégration selon Skanes (1996), raison pour laquelle il est nécessaire d'accepter des variations dans l'interprétation et la définition du « paysage », au lieu de sélectionner un paradigme unique. Nous allons utiliser une définition large, adoptée par le Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes (GECOS) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), qui laisse place à différentes approches possible (Iorgulescu, 2000) : « Le paysage est un espace hétérogène, cohérent et dynamique, résultat d'une co-évolution de facteurs écologiques, sociaux, culturels et économiques, mais qui est perçu d'une manière unitaire et distincte de ses voisins ». Les éléments de ce concept apparaissent également dans les définitions données par d'autres auteurs : Lee et al. (1992) définissent le paysage comme une mosaïque dynamique de taches naturelles et de taches créées par l'homme, qui varient en taille, forme et arrangement, ce qui permet de comprendre les effets cumulés de décisions individuelles, concernant l'utilisation du sol, sur les processus écologiques qui s'opèrent à plus larges échelles. Cette compréhension large de la structure et de la fonction du paysage est essentielle pour promouvoir la gestion intégrée du paysage. Hill, cité dans (Phipps et al., 1986b), va plus loin en définissant un paysage écologique comme une mosaïque d'écosystèmes connectés fonctionnellement à des ressources distribuées dans l'espace. Ces deux notions sont différentes selon Baudry & Burel (1985) : Un écosystème est souvent homogène, alors qu'un paysage est une surface hétérogène dont chaque élément peut être localisé par ses coordonnées et relativement les uns par rapport aux autres. Un paysage peut être considéré comme un assemblage ou une partie d'un système, ce qui lui donne une nature systémique et qui permet d'étudier les transactions entre les écosystèmes. Il est le résultat tangible et caractéristique des interactions entre une société, les conditions physio-géographiques données, ainsi que les processus et conditions biotiques et abiotiques. Finalement, dans la conception « Paysage suisse » (OFEFP, 1998), la notion de paysage est définie comme l'ensemble de l'espace, à l'intérieur et à l'extérieur des agglomérations, qui résulte de la conjonction évolutive de facteurs naturels tels que le sous-sol, le sol, l'eau, l'air, la lumière, le climat, la faune et la flore, ainsi que de facteurs sociaux, culturels et économiques.

Nous complétons la définition de GECOS par celle de Phipps (1985), plus technique, qui caractérise sa méthode d'analyse Pegase : il définit le paysage 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. Ce canal est conçu comme la traduction en termes de la théorie de l'information du concept d'espace transactionnel avancé par Hills (1974) (Fig.2.1).

Fig.2.1 : Illustration du paysage vu comme un canal d'information entre l'espace abiotique et l'espace biotique, le chevauchement des deux cercles représentant la redondance entre les deux espaces et l'organisation spatiale écologique du paysage (tiré de Fig. 5.2 dans (Phipps, 1985)).



Le paysage peut-être perçu de différentes façons selon l'observateur et selon le but poursuivi. Selon l'OFEFP (1998), cette notion complexe comprend différents aspects : Milieu vital, Espace naturel, Espace culturel, Espace économique, Espace de découvertes, Espace international, Bien commun, Espace auquel on s'identifie, Témoin de l'Histoire de la Terre, Produit de notre perception critique. Skanes (1996) traduit la subjectivité de cette notion par dix façons de regarder un même paysage : comme Nature, Habitat, Objet fabriqué, Système, Problème, Richesse naturelle, Idéologie, Histoire, Endroit ou Esthétique.

Certains de ces points de vue (par exemple Bien commun, Produit de notre perception critique, Idéologie) sont utilisés, dans notre étude, de façon implicite lors du choix des approches des différentes phases du travail. D'autres (par exemple Habitat, Problème, Richesse naturelle) sont explicitement utilisés dans la définition du but, de la zone d'étude, de la période d'étude, des variables, des scénarios, etc.

Les composantes du paysage sont les suivantes (Skanes, 1996) :

- Biotope : Elément du paysage ou Element spatial selon Forman (1995), une unité relativement homogène reconnue dans une mosaïque à l'échelle du paysage, resp. à n'importe quelle échelle.
- Ecotone : Zone de transition entre deux systèmes écologiques adjacents.
- Ecotope : La plus petite unité spatiale écologique significative en écologie du paysage, avec, souvent, une certaine homogénéité au niveau de la structure de la végétation.
- Habitat : Partie d'un écosystème où une espèce vit et se reproduit.
- Element du paysage. Terme très neutre désignant une unité relativement homogène, reconnaissable dans une mosaïque. Cette notion peut être définie plus précisément en cas de besoin.
- Unité de sol : Traduction du terme anglais « land unit », désignant une étendue écologiquement homogène à l'échelle considérée.
- Type d'utilisation du sol : Type de gestion en terme de pratiques socio-économiques, telles que pâture, fauche, foresterie, culture ouverte. Caractéristique parfois difficile à reconnaître sur des cartes ou des photos aériennes.
- Type de couverture du sol : résultat de conditions naturelles ainsi que des utilisations passées et présentes du sol. Caractéristique souvent représentée par le type de couverture végétale.
- Petit biotope : Taches restantes d'éléments dans un paysage agricole ou forestier. Notion similaire à Ecotope.
- Utilisation agricole du sol : Selon Dumanski et al. (1987), fait référence au mode d'utilisation du sol pour la production dans une exploitation agricole.

Ces éléments répartis dans le paysage forment des :

- Taches : Unités fonctionnelles, non-linéaires, relativement homogènes et qui diffèrent des environs (Forman, 1995).

- Matrices : Réseaux formés par une unité qui occupe plus de 60% de la surface totale et qui présente de bonnes connections (Glenz, in press).
- Corridors : Bandes d'un type particulier qui diffèrent des terres adjacentes sur les deux cotés, dont la fonction peut être de liaison, de barrière ou d'habitat (Forman, 1995).
- Mosaïque : Ensemble de taches
- Réseaux : Ensemble de corridors
- Patrons : Arrangement spatial de la mosaïque et des réseaux.

La **structure** du paysage est caractérisée par sa **composition**, qui peut être mesurée à l'aide de métriques non explicites du point de vue spatial concernant la présence et l'abondance d'unités (par exemple la taille, la surface relative, le nombre), et par sa **configuration** qui peut être mesurée à l'aide de métriques explicites du point de vue spatial concernant la distribution et l'arrangement des unités dans l'espace (par exemple l'indice de similarité du paysage, l'indice de forme du paysage, la dimension fractale ou encore l'indice de proximité tels que le calcule le logiciel Fragstat (McGarigal & Marks, 1995).

La représentation de la structure interne du paysage et de son unité fonctionnelle passe par la définition de la taille du **grain**. Du point de vue des organismes vivants, le grain est la surface minimale à laquelle l'organisme perçoit et répond à la structure des taches du paysage. On parle aussi de résolution spatiale. A l'opposé, l'**étendue** est l'échelle la plus large à laquelle l'organisme réagit. L'étendue peut aussi être utilisée pour désigner la durée (temps) étudiée. La taille du grain et l'étendue définissent les limites de résolution inférieure et supérieure d'une étude, elles doivent être adaptées à l'échelle spatiale des processus étudiés (Glenz, in press). L'**échelle spatiale** est un terme qui peut prêter à confusion : en écologie du paysage, une étude à une large échelle spatiale concerne une grande zone, peu détaillée, alors qu'en géographie ou cartographie, une large échelle signifie une représentation selon une large fraction (par exemple 1:10'000 par rapport à 1:250'000), donc très détaillée (Withers & Meentemeyer, 1999). En principe, une étude à une large échelle (pour un écologue) utilise un grain de taille plus grossière alors qu'une étude à une petite échelle utilise un grain de taille plus fine.

Dans cette étude, nous utiliserons le concept « paysage » de la façon suivante :

- A. Lors de la phase descriptive de l'état du paysage, nous emploierons la notion de type d'utilisation du sol, incluant les éléments construits (routes, bâtiments,...), mais en insistant sur la zone agricole et les pratiques agricoles. La notion d'habitat est sous-entendue par le choix de notre zone d'étude qui est l'habitat potentiel du lièvre.
- B. Notre étude sera effectuée à une large échelle selon la terminologie de l'écologie du paysage, avec comme grain la commune (unité spatiale), et comme étendue la partie Nord-Ouest de la Suisse. Bien que le lièvre utilise comme domaine vital un espace plus retreint que la commune, tous les éléments ayant trait au lièvre brun seront également rapportés au grain de la commune pour pouvoir être comparés aux descripteurs du paysage.

2.3 La dynamique du paysage

2.3.1 La description d'un état et d'un changement d'état

2.3.1.1 Généralités

Il existe un très grand nombre d'études portant sur la description d'un état d'un paysage, que se soit par rapport à sa couverture végétale, son utilisation du sol, sa fonction d'habitat pour la faune, etc. En dynamique du paysage, les auteurs ne s'arrêtent pas à la description d'un état, mais cherchent à décrire l'évolution entre des stades successifs. Une bonne revue de ces modèles a été effectuée par Baker (1989) qui décrit les hypothèses, les limites et les applications possibles des modèles, les classe, et enfin propose des extensions sur la base de modèles développés dans d'autres domaines. Nous ne citerons ici que trois modèles comme exemples :

- La méthode d'analyse Pegase (Phipps, 1981) qui permet de déterminer les relations écologiques entre un jeu de variables descriptives superposées. Il fonctionne selon un algorithme hiérarchique divisif multivarié, basé sur la théorie de l'information, dans sa version thermodynamique selon Boltzmann. A l'origine, il avait été développé pour décrire l'état de couverture ou d'utilisation du sol à une époque. Depuis, il a aussi été appliqué pour répondre à des questions d'un autre type (de Pablo et al., 1988 ; Davis & Dozier, 1990). Phipps et al. (1986a) décrivent l'état d'utilisation du sol à trois périodes (1956, 1965 et 1978), mesurent chaque fois la redondance et l'entropie de l'environnement, puis montrent l'évolution de ces résultats. C'est une méthode d'analyse, mais elle peut être considérée comme prédictive dans le sens où les classes sont développées par combinaisons de cartes qui produisent un patron qui ressemble, le plus près possible, à la carte dessinée par la variable dépendante. Nous présenterons plus longuement cette méthode au chapitre 6 « Le lièvre et le paysage » avant de l'appliquer à notre base de données.
- Un modèle de simulation spatialement explicite (Wear et al., 1996 ; Flamm & Turner, 1994), qui permet de calculer la probabilité d'une parcelle de se transformer d'un type de couverture du sol à un autre avec comme variables des facteurs socioéconomiques et écologiques. La distribution de la couverture du sol est ensuite analysée en utilisant un jeu de métriques, tels que la proportion de surface occupée par chaque type de couverture du sol, la longueur de lisières, la surface et le périmètre des taches, etc. Ils aboutissent à la conclusion que le type de couverture du sol est une variable trop grossière pour être tout à fait satisfaisante. Ils ajoutent que ce type de projection dans le futur, par simulations, ne doit pas être vu comme un modèle de prévision, mais une indication de la direction des changements attendus.
- Une matrice de données spatio-temporelles décrivant deux zones d'étude de 9 km², et à 12 époques différentes, réparties sur la période 1888-1982 (Kienast, 1993). Les types d'utilisation du sol ont été digitalisés à partir des cartes topographiques sur un SIG. Les patrons du paysage relevé ont été caractérisés par un certain nombre d'indices statistiques : diversité, dominance,

nombre de frontières entre les types d'utilisation du sol, dimension fractale des taches d'utilisation du sol.

Ces trois modèles sont des exemples de trois techniques bien distinctes qui font appel à des données de bases récoltées à des échelles différentes, mais dont le but final est le même : découvrir un modèle de l'organisation du paysage et les principes qui régissent sa dynamique.

2.3.1.2 Outils

Durant ces dernières années, l'écologie du paysage a montré un fort développement, grâce aux nouvelles techniques de gestion des informations spatiales, comme la télédétection et les SIG. La télédétection permet de récolter et traiter les informations spatiales, alors que les SIG permettent de conserver et manipuler les données à références spatiales avec leurs attributs (Johnson, 1990). Les SIG permettent de gérer des données provenant de différents types de sources, de les stocker dans des couches séparées et d'exécuter des intersections verticales entre ces couches, pour calculer des intersections, ou pour détecter des évolutions temporelles. Des erreurs peuvent toutefois apparaître, lorsque des manipulations sont effectuées sur des données à différentes échelles, sur des données classifiées ou agrégées, ou encore sur un mélange de données de type raster et vecteur. Cet outil prendra de plus en plus d'importance en écologie du paysage, pour stocker les données, les agréger et désagréger sur les échelles spatiales, ou encore extraire celles récoltées par télédétection.

Nous utiliserons les SIG dans cette recherche pour extraire les données, pour effectuer des interpolations spatiales (agrégations de données géo-référencées) ainsi que pour produire des cartes montrant l'arrangement spatial des variables et des résultats.

2.3.1.3 La surveillance du paysage en Suisse

Le premier travail de recherche sur la dynamique du paysage en Suisse date des années '70. Ewald (1978) a décrit dans les détails, de façon qualitative et quantitative, l'évolution de plusieurs zones, réparties sur l'ensemble du pays, sur la base d'observations de photos, de photos aériennes et de travail de terrain.

Auparavant, l'état de l'occupation du sol avait déjà été relevé au début du siècle et en 1952 (Bureau fédéral de statistique, 1953), mais c'est en 1980 seulement qu'il a été décidé de mener cet inventaire de façon systématique afin de pouvoir suivre les modifications. L'Office fédéral de statistique (OFS) a entrepris de recueillir, de façon systématique, les données utilisées pour la remise à jour périodique des cartes nationales afin de relever les modifications du paysage intervenues entre les années '70 et '90 (OFS, 1996). Ce modèle est descriptif de trois époques (1972 ; 1979/85 ; 1992/97). Il recense l'occupation du sol sur un échantillonnage uniforme (une grille avec mailles de 100x100m), à partir des photos aériennes qui sont à la base des cartes topographiques nationales. Cette base de données est distribuée par le service GEOSTAT de l'OFS. Les résultats, observations et calculs des modifications entre les époques sont décrits dans (Bureau fédéral de statistique, 1972), (Sigmaplan/Metron/Metrotest, 1994), (OFS, 1996), (OFEFP, 1998) et (OFS, 2001).

L'OFAG (2001) relève tous les 4 ans la végétation des surfaces de compensation écologique de 40 communes du Plateau suisse dans le cadre du projet « Monitoring sur le Plateau ». Ce projet partiel devrait donner un aperçu de l'évolution temporelle spatiale et qualitative des surfaces de compensations écologiques en Suisse.

La Station ornithologique suisse de Sempach a mis au point en 1987 une méthode d'inventaire des biotopes (LRI), avec laquelle elle a décrit plusieurs zones d'étude et dont le canton de Lucerne entier fait partie (Pfister & Birrer, 1997). En 1996, une surface totale de 1'300 km² était ainsi cartographiée. Cet inventaire est effectué, en plus grande partie, par relevés sur le terrain et sera réactualisé tous les 10 ans, dans le but de pouvoir quantifier les changements.

D'autres projets d'étude du paysage sont en cours dans différents instituts en Suisse, par exemple, l'analyse historique des patrons du paysage décrite auparavant (Kienast, 1993).

Notre recherche se base sur les résultats et connaissances acquises par les différents travaux exposés ci-dessus, mais aborde la problématique de l'étude de la dynamique du paysage d'une façon différente. En effet, notre base de données :

- Rassemble des critères plus diversifiées que l'OFS (1996) et Kienast (1993), ou un LRI : Elle inclut des variables sociologiques, économiques, climatiques, physiques, en plus de variables décrivant les pratiques agricoles.
- Décrit le paysage au niveau communal : Ceci permet la mise en relation avec des mesures de gestion communales, au contraire des données sous forme SIG (GEOSTAT) de l'OFS (1996) qui décrivent des points répartis régulièrement, dont l'agrégation par surfaces pose des problèmes méthodologiques (Miserez, 1999).
- Décrit le paysage sur un échantillon de 936 communes réparties dans la partie Nord-Ouest de la Suisse représentant près de 8'000km², donc une surface plus importante que le LRI de la Station ornithologique suisse de Sempach, ou que celle analysée par Kienast (1993).
- Décrit le paysage à cinq époques entre 1950 et 1990, donc une période plus étendue que les trois études citées auparavant.
- Sera analysée non seulement à l'aide d'outils statistiques, mais également avec un instrument scientifique innovateur, la méthode Pegase.

2.3.2 Les processus

Nous concentrons notre attention sur les processus liés aux activités humaines. En effet, les processus naturels sont peu importants dans notre zone d'étude. En effet, les phénomènes d'érosion, d'éboulements ou de débordements de cours d'eau sont rares, irréguliers, accidentels et plus ou moins maîtrisés par l'homme. La reforestation spontanée est plus fréquente, mais elle n'est pas tout à fait un phénomène naturel non-plus : c'est tout de même l'homme qui décide d'utiliser cet espace ou de le laisser à l'abandon. Le mouvement des glaciers est un processus naturel important, mais hors de notre zone d'étude. En général, selon Farina (1998), les perturbations naturelles ont une influence profonde sur l'évolution historique du paysage, mais l'influence humaine les couvre ou les masque par

leur fréquence d'occurrence plus élevée. Il ajoute que les processus généraux de dynamique du paysage, directement liés aux activités humaines, sont : l'intensification de l'agriculture, la déprise agricole, la disparition des feux naturels, la déforestation, la pâture et le développement. Ci-dessous, nous allons essayer de découvrir ces processus en observant les modifications qui ont eu lieu en Suisse depuis 1900.

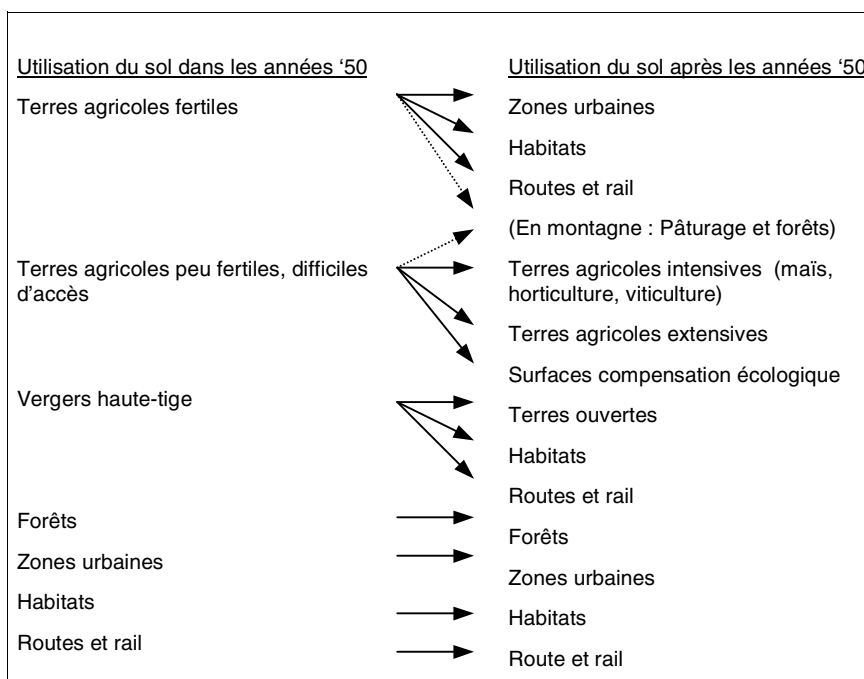
Le XXème siècle a vu l'utilisation du sol se modifier de façon importante et souvent irréversible, dont les grandes lignes sont schématisées dans Fig.2.2. Selon Broggi & Schlegel (1990), les terres relativement plates et fertiles, surfaces agricoles ou surfaces naturelles, sont transformées en zones urbaines (Fig.2.2). En même temps, des terres moins fertiles, surfaces naturelles ou proches de l'état naturel⁵ commencent à être exploitées de façon de plus en plus intensive. L'intensification des pratiques agricoles passe essentiellement par la mécanisation et conduit, entre autres, à une augmentation de la taille des champs, la disparition des lisières avec végétation et l'augmentation de l'utilisation d'engrais et pesticides chimiques (Fjellstad & Dramstad, 1999). D'un autre côté, les terres agricoles situées sur des terrains à forte pente ou difficiles d'accès sont abandonnées. Ces évolutions ne sont toutefois pas constantes. Tout d'abord, la deuxième guerre mondiale provoque une discontinuité, pendant laquelle des mesures d'urgences ont été prises (« Plan Wahlen »): de grandes surfaces ont été mises en culture après drainage de zones humides et remaniements parcellaires, on a exploité intensivement les tourbières pour remplacer le charbon, et finalement les champs serviront en majorité à la culture de la pomme de terre (surface quatre fois plus grande en 1944 qu'aujourd'hui) (Kienast, 1993 ; Rieder, 1996). Ce dernier ajoute que l'augmentation de l'intensité de la production, juste après la guerre, mesurable par exemple en terme de nombre de têtes de bétail par surface, était la plus importante dans le monde : Le cheptel bovin passe de 1'268'000⁶ en 1941 à 1'466'000 en 1978 (Secrétariat des paysans suisses, 1988). Durant les 50 années suivantes, la tendance majeure est une explosion de l'urbanisation, accompagnée d'une diminution de la surface agricole (1'254'000ha en 1955 et 1'202'000ha en 1990). Ce dernier phénomène est en moyenne beaucoup plus important dans les pays de la Communauté Européenne (-8% entre 1965 et 1983 d'après Green, cité dans (Fjellstad & Dramstad, 1999), contre -0,4% en Suisse entre 1965 et 1985 d'après Broggi & Schlegel (1990)). Baudry et al. (1999) notent partout en Europe, le phénomène double d'intensification et de marginalisation, mais Reenberg & Baudry (1999) remarquent que chaque région d'Europe présente ses propres tendances de développement. On peut même affirmer que chaque région, à l'intérieur d'un pays, montre des tendances de développement différentes : En Suisse, la part de surface agricole sur l'ensemble du pays est de 36.9%, mais elle est beaucoup plus importante sur le Plateau et dans le Jura (50.9%, resp. 44%) que dans le versant nord des Alpes, les Alpes centrales occidentales, les Alpes centrales orientales ou le versant sud des Alpes (38.2%, resp. 19.8%, 31.4% et 13.9%) (OFS, 2001), bien que la surface agricole ait augmenté ces 20 dernières années dans les Alpes, avec la reprise de l'exploitation des pâturages d'été et des mayens. D'autres

⁵ Une surface proche de l'état naturel est un biotope qui se distingue des surfaces exploitées de façon intensive par une diversité plus grande des espèces et/ou par la présence d'espèces rares selon Broggi & Schlegel (1990). Selon le SRVA (1997), elle se distingue d'une zone naturelle par son caractère dépendant de l'influence humaine. Exemples : marais, prairie sèche riche en espèces, haie, bosquet, prairie extensive.

⁶ Exprimé en unité de bétail.

pays, en Europe, montrent une hétérogénéité encore plus marquée, comme par exemple la Suède, où la part moyenne sur l'ensemble du pays était de 6 à 7% dans les années '80, mais de 45% au Sud et au Centre (Ihse, 1995). Broggi & Schlegel (1990) énumèrent quelques transformations annuelles moyennes de changements observés entre 1973 et 1982 sur le Plateau suisse : 1'168 nouveaux bâtiments hors des zones urbaines, 588 ha de nouvelles zones urbaines, 181 km de nouvelles routes, 446 ha de vergers défrichés, 25 ha de marais asséchés et mis en culture, 89 km de haies défrichées, 66 km de nouvelles haies, 2800 arbres isolés abattus, etc.

Fig.2.2 : Principales utilisations du sol dans la partie Nord-Ouest de la Suisse dans les années '50 et leurs transformations.



Plusieurs auteurs s'accordent à dire que la variation de surfaces consacrées à l'agriculture n'est pas le point le plus important, mais plutôt les changements de type d'exploitation agricole, dus à l'apparition des moyens mécaniques (on passe de 60'000 tracteurs à 4 roues en 1965 à 105'000 en 1985), ce qui a entraîné une diminution de la main-d'œuvre dans le domaine agricole (421'000 en 1955 et 130'000 en 1985) (Kipfler, 1988; Rieder, 1996). Le nombre d'exploitations agricoles diminue de 42% entre 1955 et 1985, alors que leur taille moyenne augmente de 70%. Le nombre de parcelles par exploitation passe de 8,3 à 6,4 entre 1955 et 1980 et, en même temps, la taille moyenne des parcelles passe de 0,66 à 1,37ha. Conséquence de ces modifications, la productivité et les rendements s'accroissent considérablement. Le type de culture a également évolué : entre 1955 et 1985, les prés à litière diminuent de 69% au profit des terres ouvertes (+10%) et des vergers intensifs (+73%) (Broggi & Schlegel, 1990). Haies, fossés ouverts et vergers traditionnels ont disparu ou ont été remplacés, alors que jachères et parcelles peu productives ont été fertilisées pour améliorer le rendement agricole (Pfister & Birrer, 1997). L'utilisation des engrais est d'ailleurs devenue plus de quatre fois plus importante entre 1952 et 1972 (Broggi & Schlegel, 1990). 90% des prairies maigres ont disparu depuis 1990, et le reste est menacé par l'abandon des exploitations agricoles. Plus de

90% des zones humides ont disparu durant ces 150 dernières années. Tous ces exemples montrent une tendance d'uniformisation du paysage et d'appauvrissement, en terme d'habitat pour la faune et la flore: une forte proportion d'animaux et de plantes caractéristiques de la zone rurale ont diminué, voire disparu, suite à la faible diversité des habitats (Pfister & Birrer, 1997). Malgré tout, Kienast (1993) tire comme conclusion de son analyse de l'évolution sur 100 ans d'une zone de 9km², que la situation tend à s'améliorer depuis les années '70.

Depuis une vingtaine d'années, l'évolution s'est poursuivie de la façon suivante : les fermes des zones agricoles se transforment petit à petit en résidences (Wegelin, 1996), 2'000 fermes sont abandonnées chaque année, et en même temps, de plus en plus de nouveaux bâtiments se construisent hors des zones urbaines (augmentation du nombre de nouvelles constructions de 9,7% entre 1980 et 1990). D'un autre côté, de plus en plus de fermes pratiquent une exploitation plus extensive : la somme allouée pour des contributions écologiques, en majeure partie pour la Production Intégrée (PI), a doublé entre 1994 et 1995 ; les contributions pour des prestations écologiques ont passé de 1 à 17,7 millions entre 1987 et 1994 (OFS & OFEFP, 1997). Malheureusement, les terres utilisées de façon extensive ne sont, pour la plupart, pas choisies en fonction de leur intérêt écologique, mais parce qu'elles ne permettent pas un rendement économiquement intéressant. Ceci mènera probablement à une ségrégation entre les terres intensives et extensives, ce qui peut avoir des répercussions négatives sur la nature et le paysage (Jans, 1996). Cet auteur ajoute que l'introduction en 1997 d'un minimum de 5% de terres en exploitation écologique, qui vise, entre autres, le maintien d'habitats importants pour des espèces en danger, ne permettra probablement pas d'enrayer la disparition des espèces. Fjellstad & Dramstad (1999) montrent que la biodiversité dans le paysage rural est élevée sur des petits biotopes ou taches avec des vestiges d'une certaine végétation, s'ils sont répartis selon une configuration intéressante. Il ajoute que cette qualité est particulièrement menacée par certaines pratiques agricoles.

A chaque période correspondent quelques phénomènes majeurs : Avant 1900 déjà ont eu lieu d'importantes corrections de cours d'eau, des constructions de chemins de fer et de zones industrielles. Jusqu'à la deuxième guerre, la vitesse de développement était constante, bien que différente selon les régions. Les changements ont été plus importants durant la guerre, particulièrement avec la mise en culture de nouvelles parcelles agricoles, après drainage de zones humides. Entre 1950 et 1970, le développement s'est accru de façon exponentielle grâce aux nouvelles techniques, en particulier par la construction de lotissements industriels et urbains ainsi que de nouvelles routes. D'importants remaniements parcellaires ont eu lieu durant les années '70. Entre 1970 et 1990, de nouvelles constructions de routes, surtout agricoles non-goudronnées, ainsi que de nouvelles corrections de cours d'eau ont vu le jour.

Jusqu'au début du XX^e siècle, l'espace urbain présente une structure décentralisée (AT, 2000). Après la seconde guerre mondiale, conséquence d'une mobilité croissante, le phénomène de suburbanisation fait son apparition : extension du tissu urbain au-delà des limites d'une seule commune et différenciation fonctionnelle entre le lieu d'habitat et lieu de travail. Vers 1970 apparaît le phénomène de périurbanisation : extension spatiale continue, mais éparpillée, du tissu urbain, accompagnée d'une diminution de l'espace entre la commune-centre de l'agglomération et les

communes périphériques. Le concept d'agglomération est résumé par Schuler et al. (1997) comme un ensemble de communes adjacentes, comprenant au total au moins 20'000 habitants, alors qu'une ville est une commune de 10'000 habitants ou plus. Les communes faisant partie d'une agglomération ont souvent un lien morphologique (continuité du bâti) avec la zone-centrale formée d'une ou plusieurs communes-centre, et présentent des rapports d'interdépendances fonctionnelles avec elle ainsi qu'une marque de l'urbain du point de vue économique et social. Une commune qui n'appartient pas à la zone-centrale doit remplir 3 parmi 5 conditions portant sur la continuité du bâti ou de la part de la population active et résidente. En 2000, le système urbain suisse est constitué de 48 agglomérations. L'espace urbain, hiérarchisé selon le nombre d'habitants, est essentiellement formé de moyennes et petites agglomérations, sauf Zurich avec 940'000 habitants. On assiste à une intense concentration des activités dans les agglomérations les plus importantes et aucun signe n'indique une inversion de cette tendance. Les agglomérations qui présentent d'étroites relations fonctionnelles et un lien de continuité territoriale sont regroupées dans 5 aires métropolitaines : Zurich, Berne, Bâle, Genève-Lausanne, et le Tessin.

La séparation des lieux d'habitat et des lieux de travail, de loisirs et d'achats, crée un flux pendulaire important entre la périphérie des agglomérations et les villes-centres. Ce phénomène n'a cessé d'augmenter dans toutes les régions de Suisse entre 1980 et 1990 (AT, 2000). De plus, l'éloignement et la dispersion des lieux d'habitat rendent difficiles le développement des transports publics. Dans les cantons urbains, les distances parcourues par les habitants sont relativement courtes, les trajets peu nombreux, mais les temps de parcours proportionnellement longs, dus à la vitesse limitée des voitures et des transports publics (Schuler et al., 1997). Hors des zones d'influence des grands centres, les habitants parcourent des distances assez courtes (déplacements locaux), peu souvent et dépensent peu de temps pour les déplacements, souvent effectués à pieds malgré un fort taux de motorisation. En 1990, on compte que la moitié des distances parcourues est liée à des activités de loisirs et 21% au trajet pour se rendre au travail.

Les développements des réseaux de transports se résument de la façon suivante (Schuler et al., 1997) : le réseau autoroutier apparaît en 1960 seulement, suite à l'ouverture de tronçons autoroutiers en Allemagne et en Italie menant aux tunnels du Gd-St-Bernard et du Gothard, facilitant l'accès à la Suisse, dans la perspective de la réalisation d'un réseau international. Entre la fin du XIX^e siècle et 1970, il n'y a pas eu de nouvelles constructions de lignes ferroviaires. Depuis cette date, quelques nouveaux tronçons, le long des grands axes, ont été réalisés, et le nombre de trains a été augmenté. Actuellement, le réseau ferroviaire suisse couvre environ le même périmètre que celui des autoroutes, avec un réseau nettement plus dense que dans tous les pays voisins.

Le développement de l'occupation du sol en Europe est résumé par Reenberg & Baudry (1999) de la façon suivante : les conditions et processus de développement, dans les zones rurales, montrent de véritables différences entre les régions. En effet, dans les régions peu développées, le système agricole n'est qu'au début de son processus de transformation. Pour ces régions, des hypothèses sur les conséquences de transformations peuvent être formulées sur la base d'observations historiques de régions plus avancées. En général, le développement en Europe peut être vu comme un mélange entre deux tendances : intensification et marginalisation. Les régions fertiles présentent un paysage

plus stable, alors que les régions moins fertiles sont plus sensibles aux conditions de production et de marché. Les différences entre les zones exploitées de façon intensive et extensive s'accroissent. Une certaine hétérogénéité est produite par les terres abandonnées et les terres laissées en friche. Ces dernières peuvent être gérées en fonction d'un but bien défini, au contraire des terres abandonnées.

Les changements d'utilisation des terres au niveau planétaire et par continent, entre 1920 et 1980, ont été répertoriés par Richards cité par Burel & Baudry (1999) : on constate un recul des formations boisées (-11%), une très légère augmentation des formations herbacées, une forte expansion de la mise en labours (+64%) qui va en s'accroissant depuis la seconde guerre mondiale. Ces transformations sont dues à l'augmentation de la population humaine qui est passée de 2 milliards en 1920 à 4,4 milliards en 1980.

2.3.3 Les facteurs d'influence

Les processus qui ont eu lieu, ou qui sont actuellement en cours, sont dictés par des facteurs d'influence que nous nous efforcerons de traduire par des variables, nécessaires à la modélisation de la dynamique du paysage. Comme nous l'avons déjà noté, les processus les plus marquants sur le paysage de notre zone d'étude sont liés aux activités humaines, desquels découlent trois types de facteurs d'influences :

- A. Les **conditions économiques générales**, qui sont les facteurs humains les plus importants selon l'OFEFP (1998). Le trafic des marchandises a quintuplé depuis 1950, pendant que la consommation d'énergie totale a quadruplé. Viennent ensuite la croissance démographique (la population a doublé depuis 1900), la modification de l'échelle des valeurs dans la société (le temps de travail a diminué de moitié depuis 1930, alors que les revenus ont augmentés), les normes et les besoins actuels en matière d'habitat ou de loisirs (nouvelle structure spatiale de ces secteurs, augmentation du parc automobile). Ces causes expliquent en grande partie les processus qui sont décrits dans la section précédente. Cette théorie est reprise par Farina (1998), selon lequel les variables impliquées dans les changements d'un paysage à dominance humaine sont, pour la plupart, liées à des processus socio-économiques.
- B. La **gestion du territoire et des ressources**, très spécifiques à la Suisse. On parle beaucoup actuellement de développement durable. Ce concept est défini par la Commission Bundtland comme étant : « une manière de permettre à tous les hommes de satisfaire leurs besoins actuels sans compromettre la satisfaction des besoins des générations futures » (WCED, 1987). La situation en 1960 a plusieurs fois déjà été retenue comme objectif de référence : Broggi & Schlegel (1990) calculent les surfaces naturelles et proches de l'état naturel à reconquérir pour rétablir la diversité et la qualité du paysage de cette époque-là. Selon eux, 12% au minimum du Plateau suisse devrait être couvert par des surfaces proches de l'état naturel, alors que cette part n'était en 1990 que de 6.7%, c'est-à-dire 3.5% de la SAU. Un certain nombre de projets sont en cours afin d'atteindre cet objectif, au travers de la gestion du territoire et des ressources. Ces programmes et recommandations sont des forces motrices pour le développement du futur paysage. Ainsi :

- Le Gouvernement Fédéral a fixé comme objectif pour l'an 2005 de gagner, dans la zone agricole du Plateau suisse, 65'000ha de surfaces de compensations écologiques (SCE), de qualité, afin d'atteindre l'objectif de 10% de la surface agricole utile (SAU). C'est pour cette raison que les paiements directs pour mesures écologiques ont été introduits en 1993 (OFAG, 2001), puis, en 2001, les contributions à la qualité écologique, visant à récompenser les SCE d'une qualité biologique particulière et la mise en réseau de SCE (Ordonnance sur la qualité écologique (OQE), introduite en 2001).
 - Un système d'indicateurs de la durabilité a été mis sur pied en Suisse, conformément aux directives de l'ONU et de l'OCDE sur la capacité de comparaison des données entre Etats et à l'engagement que la Suisse a pris lors de la Conférence de Nations Unies sur l'environnement et le développement à Rio en 1992. Parmi les 34 indicateurs retenus, 18 sont des indicateurs écologiques, dont : changement d'utilisation du sol, surface agricole utile par habitat, proportion des zones protégées, proportion d'espèces menacées, utilisation d'énergie, de produits phytosanitaires et d'engrais dans l'agriculture (Sotoudeh, 1998).
 - Le Conseil Fédéral a accepté la Conception Paysage Suisse en décembre 1997 (OFEFP et al., 1999), pour laquelle 24 idées spécifiques ont été élaborées (Herrmann, 1997) et pour laquelle les régions prioritaires et les zones de compensations écologiques ont été désignées (Broggi & Schlegel, 1998).
 - Un programme national de recherche « Utilisation du sol en Suisse » a été lancé dans les années '80 (Broggi & Schlegel, 1990).
 - Un guide pratique pour les exploitants agricoles a été publié dans les années '90 (Amstutz et al., 1992).
- C. Les **bases légales**, évidemment elles aussi très spécifiques à la Suisse. Les lois, ordonnances, et autres réglementations (par exemple les listes d'objets à protéger) sont des forces motrices très fortes, parce que très contraignantes. La plupart sont des lois fédérales et s'exercent sur le pays entier. Seule la Police des constructions (3^e partie de la loi sur l'aménagement du territoire), qui règle la question de permettre une construction ou une installation, montre des différences significatives d'un canton à un autre (communication personnelle P.Scyboz, EPFL). Les lois et ordonnances reflètent bien la situation en matière de protection du paysage et de la nature. Elles sont donc aussi une conséquence de la dynamique du paysage. En effet, elle ont souvent été suscitées par des catastrophes naturelles ou des interventions particulièrement controversées (OFEFP, 1998). Les lois en vigueur touchant ces domaines sont les suivantes:
- Constitution fédérale, article 24, 1962,
 - Loi fédérale sur les forêts (LFo), 1991 et son ordonnance,
 - Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN), 1966 et son ordonnance,
 - Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT), 1979 et son ordonnance,
 - Loi fédérale sur la protection de l'environnement, 1983 ; Ordonnance sur les polluants du sol, 1986 ; Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (OEIE), 1988,

- Loi fédérale sur la chasse, 1986 ; Loi fédérale sur la pêche, 1979,
- Loi fédérale sur les forêts (LFo), 1991 et son ordonnance,
- Loi sur l'agriculture, 1951 ; Ordonnance sur les contributions écologiques, 1993 ; Ordonnance sur la qualité écologique (OQE), 2001,
- Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux), 1991 ; Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau, 1991,
- Loi fédérale sur les chemins pour piétons et les chemins de randonnée pédestre, 1985.

Ces lois sont continuellement révisées. Le projet de réforme agricole (OFAG, 2000) et l'avant-projet de modification de la loi vaudoise sur l'aménagement du territoire et des constructions (Biéler, 2001) donnent des indications sur les tendances pour les années à venir et nous aiderons à construire des scénarios pour le futur.

2.3.4 La modélisation

2.3.4.1 Le modèle comme instrument scientifique

Un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié en ignorant de nombreuses caractéristiques, pour se focaliser sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du modèle (Coquillard & Hill, 1997). Il peut être plus ou moins complexe et donc reproduire plus ou moins fidèlement la réalité. Mais le but n'est souvent pas de reproduire exactement un système réel, mais de comprendre l'influence d'un ou plusieurs facteurs sur un système. Cette compréhension est obligatoire, par le fait que la création d'un modèle implique le passage par des étapes successives selon Forman & Godron (1986) : Décrire l'objet, détecter les principales liaisons, les assembler selon un schéma temporaire, essayer de faire fonctionner cet assemblage, observer les différences entre la réalité et le modèle et revenir à une des étapes précédentes pour corriger les liaisons. Cette technique est utilisée dans toute sorte de domaines, qu'ils soient économiques, sociologiques ou technique. Elle est en plein développement dans des sciences plus appliquées, telles que la géographie, l'écologie et l'écologie du paysage.

Jorgenson (1994) cité par Coquillard & Hill (1997) résume en quatre points les avantages de la modélisation comme instrument scientifique. Elle permet de:

- surveiller des systèmes complexes,
- révéler les propriétés des systèmes écologiques,
- montrer des carences dans nos connaissances, définir des priorités dans la recherche,
- tester des hypothèses scientifiques.

Ces propriétés expliquent pourquoi la modélisation a été beaucoup développée depuis quelques dizaines d'années pour l'étude des systèmes naturels ou écosystèmes, qui sont des systèmes

complexes dont on ne connaît souvent pas le fonctionnement en détail et dont les phénomènes qui les régissent sont parfois difficilement dissociables en processus élémentaires simples.

Un modèle peut donc être utilisé comme **instrument scientifique pour l'étude du fonctionnement** des écosystèmes.

2.3.4.2 Le modèle comme outil de gestion

Une fois que les processus élémentaires ou complexes régissant un écosystème ont été suffisamment étudiés et compris pour être reproduits à l'aide d'un modèle et que le modèle a été validé sur plusieurs zones, il peut être utilisé comme **outil de gestion** raisonnée de notre environnement. Le modèle fournit alors aux décideurs et gestionnaires du territoire un outil de réflexion et d'argumentation, basé sur des observations et outils scientifiques. Le gestionnaire peut évaluer l'impact d'une décision en construisant des scénarios jouant sur les variables d'entrée du modèle, ce qui nécessite souvent des techniques informatiques en raison de la complexité du fonctionnement des écosystèmes.

2.3.4.3 Caractéristiques des modèles

Suivant le but poursuivi, les modèles se basent sur des approches différentes, qui constituent aussi leurs caractéristiques principales et selon lesquelles Baker (1989) les a classés pour les répertorier. Nous avons retenu comme caractéristiques les plus intéressantes :

- la nature de la réponse : déterministe (réponse univoque) ou stochastique (selon une loi probabiliste).
- le niveau d'agrégation : a) global ; b) distribué ; c) spatial. Dans le premier cas, on s'intéresse à connaître le système dans sa globalité ; dans le second, on montre des comportements dans certaines zones ; dans le troisième, on cherche à montrer des comportements différents dans chaque unité spatiale composant le système. Ces trois approches correspondent aux approches de l'écologie du paysage décrites par Baudry & Burel (1985).
- la base derrière le modèle : a) Les modèles mécanistes s'appuient sur des processus et lois démontrés pour reproduire les phénomènes observés. Ces lois peuvent être du domaine physique, biologique, chimique ou autre. En écologie, ces modèles transcrivent les raisons des changements par des lois souvent plus molles qu'en physique ou en chimie. b) Les modèles descriptifs ne s'appuient sur aucunes lois connues, mais cherchent à découvrir des « lois » ou relations entre les éléments, comme, par exemple, les modèles de régressions multiples ou les modèles utilisant des matrices de transitions (Turner, 1987). De la même façon, les modèles de type exploratoire ne s'appuient sur aucunes lois connues, mais cherche les liens entre les éléments ou les phénomènes et, ensuite, nécessitent que l'utilisateur cherche leurs causalités. Pegase, d'ailleurs défini comme une méthode d'analyse, en est un exemple. Citons comme autre exemple le modèle exploratoire développé par Mankin & Warner (1999), défini comme un arbre de classification et de régression, qui procède de façon similaire à Pegase, basé sur l'algorithme CART (Breiman et al., 1984). Finalement, les modèles conceptuels, très peu fréquents en écologie

du paysage, mais souvent utilisés en hydrologie, par exemple, réduisent le système selon un modèle plus simple et mieux connu.

- le système de représentation du temps : a) continu (sans interruptions) ; b) discret (par pas de temps ou par événements)

Dans cette recherche, nous utiliserons des modèles descriptifs stochastiques, tels que Pegase et la régression multiple. Cette dernière sera utilisée de façon déterministe, dans le sens où nous déterminerons la droite de régression ajustée sur la moyenne des observations, et non l'intervalle de confiance de cette droite qui donne la totalité des ajustements possibles. Ces deux méthodes seront décrites plus en détails dans les chapitres suivants.

Notre système est de type spatial : nous travaillons sur un système comprenant un certain nombre d'unités, positionnées dans l'espace par les coordonnées de leur limites, mais sans considérer les influences entre les unités (effets de voisinage).

Finalement, le temps est introduit dans notre recherche de façon discrète : Notre base de donnée comporte des séries temporelles de cinq valeurs, avec une valeur par décennie entre 1950 et 1990.

2.3.4.4 Les apports de la modélisation du paysage

Plusieurs auteurs insistent sur le fait qu'il faut tester la théorie à l'aide de cas d'études pratiques, tester les modèles spatialement explicites avec des données spatiales, et finalement tester les hypothèses dans des paysages actuels (Reenberg & Baudry, 1999 ; Gardner & Turner, 1991). Selon ces auteurs, seules des méthodes théoriques existent, actuellement, pour caractériser la structure du paysage et prédire les changements, rendant maintenant nécessaire la recherche de solutions créatives de type expérimental. Pegase répond en partie à ce besoin, car il fonctionne sur la base d'hypothèses, appliquées à un paysage réel. Ces auteurs concluent en encourageant le développement de méthodes qui : (1) proviennent de l'identification de composantes clés, (2) quantifient les échelles spatiales et temporelles auxquelles les prédictions valables peuvent être effectuées, (3) utilisent les méthodes de simulations pour indiquer où des informations et mesures critiques sont requises, et (4) vérifient les prédictions par comparaisons avec des données existantes. Notre étude peut contribuer à préciser ces points en : (1) identifiant les variables clés contenues dans une base de données, avec des méthodes statistiques et avec Pegase ; (2) et (3) observant l'importance des hypothèses concernant les échelles spatiales et temporelles et le choix des variables sur nos résultats ; (4) élaborant un scénario pour les années à venir, dont le but n'est pas prédire le futur, mais de vérifier que notre base de donnée ainsi que nos hypothèses concernant la dynamique du paysage permettent de reproduire l'évolution prévue dans la littérature existante (OFAG, 2000 ; Biéler, 2001 ; OFS, 2001).

Le but de ces modèles prévisionnels n'est, en effet, pas de prédire le paysage futur, mais, plus raisonnablement, de vérifier que notre compréhension du système et notre transcription par un modèle sont bonnes, comme le précisent différents auteurs (Burel & Baudry, 1999). Prédire le futur est une tâche extrêmement complexe : L'avenir du paysage reste impossible à prévoir, même par transposition des modifications quantitatives survenues jusqu'à présent, car les conditions juridiques

et les actions sur le terrain se modifient également (OFEFP, 1998). D'autres auteurs ne sont pas unanimes sur les capacités des modèles créés jusqu'à maintenant: D'un côté, Reenberg & Baudry (1999) affirment que les analyses existantes des paysages européens offrent déjà les connaissances nécessaires concernant les facteurs qui influencent le développement, la sensibilité face à différents changements (par exemple les conditions de production agricoles) ainsi que les corrélations entre les changements du paysage et l'environnement. D'un autre côté, Baker (1989) écrit qu'il y a un manque de connaissances sur comment et pourquoi le paysage évolue, et comment prendre en compte cette connaissance utilement dans les modèles. Nous remarquons que les modèles intégrant tous les facteurs d'influence, de façon spatiale, à une échelle comparable à celle utilisée pour gérer le territoire, ne sont pas nombreux. Avec notre recherche, nous voulons apporter un éclairage nouveau et innovateur, qui pourrait être utilisé pour l'élaboration de recommandations pour des stratégies de développement visant une agriculture durable.

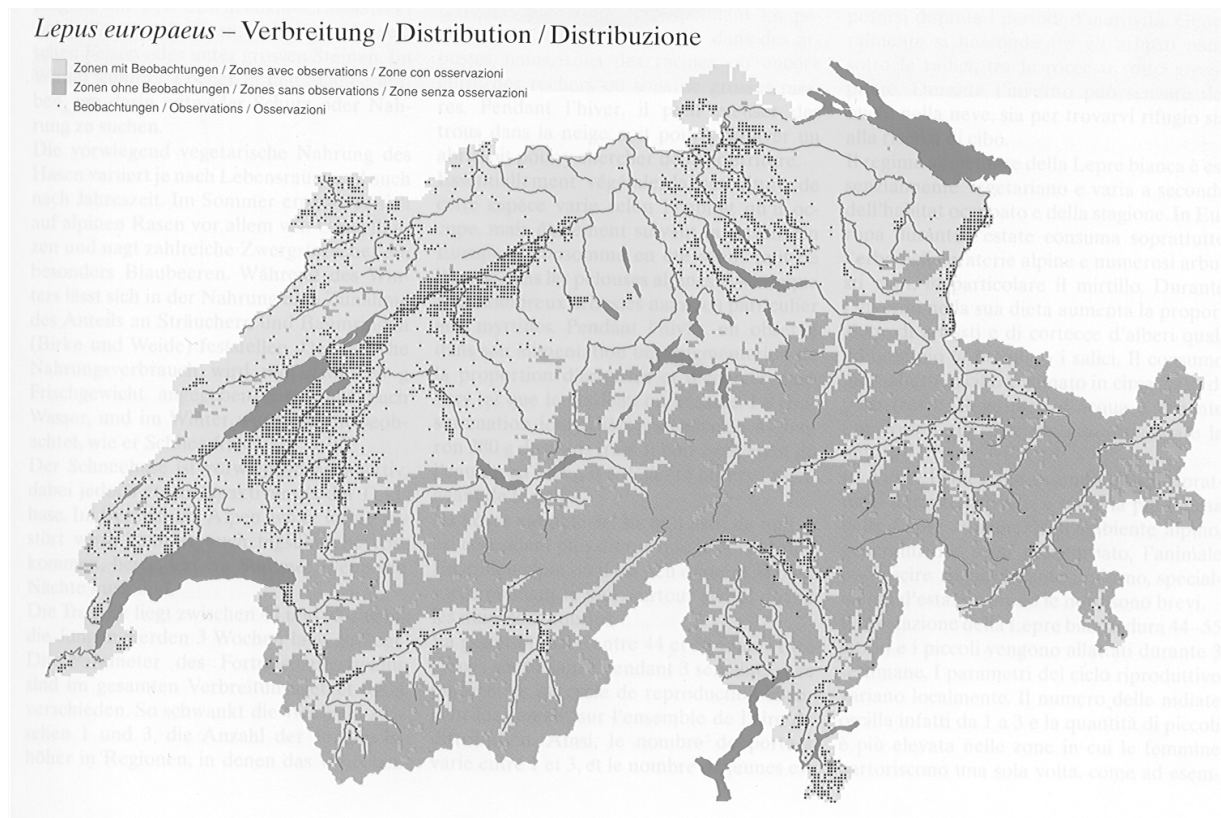
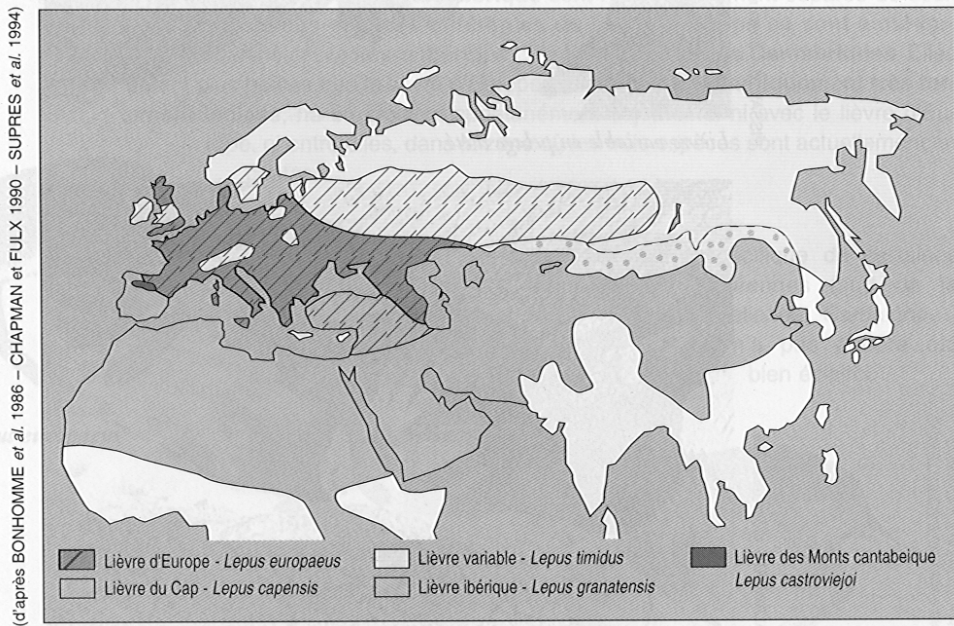
2.4 Le lièvre brun

L'habitat et les besoins du lièvre

Le lièvre brun (*Lepus europaeus*), ou lièvre d'Europe, est une espèce du genre *Lepus*, de l'ordre des lagomorphes. Il partage le territoire suisse avec le lièvre variable (*Lepus timidus*). Du fait que les deux espèces n'occupent pas le même habitat, leurs aires de répartition naturelles des deux espèces ne se chevauchent que partiellement (Fig.2.3). Le lièvre variable ne fréquente, en Suisse, que les terres en altitude (alpages caillouteux et éboulis, jusqu'à la limite des glaciers, ainsi que les zones semi-boisées) alors que le lièvre brun fréquente les terres au-dessous de 1'500m, qui ressemblent à ses steppes d'origine (Hausser, 1995). Il occupe le Plateau, l'ensemble de la chaîne jurassienne, ainsi que le fond des vallées alpines. L'espèce a été introduite à partir du milieu du XVIII^e siècle dans le sud de la Scandinavie et également sur d'autres continents à cause de son intérêt cynégétique et alimentaire. En Europe, elle continue de s'étendre vers l'est (Office national de la chasse, 1995).

Le lièvre d'Europe est bien adapté aux paysages que lui offre l'agriculture traditionnelle : une mosaïque de cultures variées assurant couvert, nourriture et espaces libres toute l'année. Résistant au froid mais sensible à l'humidité, il aime établir son gîte, une simple dépression du sol, sur un terrain sec et filtrant. Généralement gîté durant le jour, le lièvre retrouve ses congénères au crépuscule et la nuit sur des espaces dégagés. Il consomme de nombreuses plantes sauvages, mais aussi cultivées comme les céréales en herbe, le trèfle, la luzerne, le colza ou la betterave. Il se nourrit également de bourgeons, pousses et feuilles tendres, voire de l'écorce, d'arbustes ou d'arbres fruitiers, en particulier lorsque la neige recouvre le sol (Office national de la chasse, 1995).

Fig.2.3 : Répartition des espèces de lièvres en Europe et en Suisse. Tirés de (Office national de la chasse, 1995) et (Hausser, 1995).



Le lièvre brun ne défend pas son territoire (10 à 20 ha exploités intensivement), mais une hiérarchie de dominance peut être observée pour l'accès à des sites d'alimentation. Il peut, pour cela, être forcé d'effectuer de plus grands déplacements, et dans ce cas, la surface totale du domaine vital peut atteindre, voire dépasser 300 ha (*Office national de la chasse, 1995*). On rencontre les plus fortes densités d'individus dans les milieux agricoles ouverts cultivés de façon extensive (Pfister et al., 2002), caractérisés, entre autres, par des champs entrecoupés de bosquets, haies, buissons ou friches qui lui servent de réservoir de nourriture. Il apprécie particulièrement les lisières de forêts proches de prairies, ainsi que les zones de culture céréalières présentant une certaine diversité spatiale des cultures. Il se risque parfois à l'intérieur des forêts, mais sans en faire le centre de son territoire. Il préfère se tenir sur les coteaux bien exposés que dans les fonds où stagne l'air humide. Selon Pfister (1995), les densités de lièvres sont faibles dans les zones où la production laitière est importante. D'ailleurs, même si, dans la majorité des cas, la présence de bétail ne nuit pas aux populations de lièvres, on a parfois observé que le lièvre ne réutilise un pâturage que trois ou quatre jours après le départ d'un troupeau de bétail important. Avant la fenaison, on le trouve plus facilement dans les pâturages : il évite les prairies de fauche, qui ne sont donc utilisées que pendant une courte période en été. Ce phénomène a fait l'objet d'une étude en Suède (Frylestam, 1976). L'auteur en conclut que les pâturages sont appréciés pour leur végétation basse, qui permet une bonne mobilité et visibilité et procure une nourriture fraîche, mais que le lièvre se tiendra toujours à l'extrémité du pâturage où le bétail est absent, bien qu'on n'ait jamais constaté de comportement agressif du bétail.

La situation du lièvre en Suisse et dans différents pays d'Europe

La situation du lièvre en Suisse a fait l'objet d'études intensives par la Station ornithologique suisse de Sempach (Pfister et al., 2002 ; Pfister et al., 1998 ; Pfister, 1989b ; Pfister, 1989a). Nous ferons très souvent référence à ces travaux, tout au long de ce rapport. Toutes ces recherches sont basées sur celle de Pfister (1984), un travail précurseur en matière de comptage et d'évaluation de l'habitat potentiel du lièvre. Selon cet auteur, le lièvre brun est encore largement répandu en Suisse, mais avec une densité très faible (moins de 6 individus/km²). Auparavant, dans les années favorables, comme par exemple entre 1972 et 1975 dans certaines zones agricoles, elle a été de 40 à 65 individus/km². Il donne une échelle d'appréciation de la viabilité d'une population en fonction de sa densité : Avec une densité critique de 2 à 6 individus/km², l'évolution de la population n'est pas prévisible ; avec 7 à 14 individus/km², on peut s'attendre à une évolution positive annuelle de 10 à 50% ; avec 15 à 19 individus/km², on peut s'attendre à une évolution positive annuelle de plus de 100%, et un prélèvement de 20% par la chasse est possible ; avec une forte densité de 20 à 40 individus/km², l'augmentation annuelle peut être supérieure à 200%, et le prélèvement par la chasse devrait être, au minimum, de 40% pour éviter une surpopulation.

La population du lièvre brun en Suisse a fortement décliné depuis quelques décennies (voir chapitre 1 « Introduction », Fig.1.2), ceci de façon continue depuis le début des années '60 (Pfister et al., 2002). L'espèce figure maintenant sur la Liste rouge des espèces à protéger (OFEFP, 1994). Ce déclin serait dû, en partie, à l'intensification des pratiques agricoles qui a débuté à la même période et, en partie, à l'évolution générale du paysage qui se traduit par la densification du réseau de transports et par le

développement des zones urbaines. Auparavant, la population a connu une succession de pics et de creux dont les causes ont été discutées par Salzmann-Wandeler (1976).

Des comptages des populations de lièvres bruns ont été effectués sur de courtes périodes et sur des zones bien délimitées : en Suisse, des populations de lièvre brun ont été comptées et suivies entre 1972 et 1975 dans la plaine du Selzachertal (canton du Soleure) sur une surface de 330 ha, exploitée de façon intensive pour l'agriculture (Pfister, 1984). On comptait alors 25 à 30 lièvres par km² au printemps, 40 à 60 en automne. Cet auteur a sillonné le territoire de nuit, en voiture, et comptés les lièvres aperçus dans les faisceaux de deux projecteurs portant à 200 m, installés perpendiculairement à la marche. Il a repris cette méthode pour mener une campagne de comptage durant les années '90 sur plus de 200 zones réparties dans le Plateau suisse et le fond des vallées alpines (Pfister et al., 2002). La densité de lièvre ne dépasse pas 12 individus par km².

Les statistiques de la chasse sont souvent utilisées comme mesure relative de l'état d'une population de lièvres, lorsqu'il s'agit d'une longue période et de grandes surfaces (Pfister et al., 2002), permettant de comparer l'état des populations à différentes époques ou différents endroits. Ces auteurs mentionnent tout de même que cette méthode comporte certaines imprécisions et limites : le résultat de la chasse est non seulement proportionnellement plus fructueux lorsque la population de lièvres est élevée que lorsqu'elle est faible, mais dépend aussi des restrictions imposées aux chasseurs. Les données de chasse ont également été utilisées dans plusieurs autres recherches (Schröpfer & Nyenhuis, 1982 ; Engelhardt et al., 1985 ; Marboutin & Peroux, 1991 ; Pépin, 1973 ; Salzmann-Wandeler, 1976).

En France, les densités varient localement : si on observe, en moyenne, dans la plupart des régions, entre 1 et 10 individus vivants par km² de surface non-boisée, cette valeur peut atteindre localement 50 ou 100 dans des zones favorables, comme des plaines ouvertes avec des parcelles de taille modérée, des prairies naturelles et de nombreuses banquettes herbeuses. Sur des sites privilégiés et non chassés (aéroports, réserves de chasses,...), on peut observer jusqu'à 300 lièvres vivants par km² (Office national de la chasse, 1995).

En Pologne, les populations de lièvres étaient tellement importantes qu'on exportait des lièvres vers le reste de l'Europe, mais depuis 1980, les populations sont en net recul, comme dans différents pays en Europe (Pielowski, 1996).

La diminution est tellement inquiétante que des spécialistes, venus de plusieurs pays, collaborent maintenant pour comparer leurs études. Lors de leurs réunions en 1995 en Pologne et en 1996 à la Station ornithologique suisse de Sempach (Pfister et al., 2002), ils ont énuméré les facteurs qui peuvent influencer l'état d'une population à un moment : cycle naturel de variation, taille de l'habitat, structure, topographie, altitude, climat local ; type et intensité de l'agriculture ; pression de la chasse ; trafic et fragmentation de l'habitat par les routes et les zones urbaines ; probablement aussi dérangements par le tourisme et les activités sportives.

Etat de la recherche visant à identifier les facteurs d'influence des populations de lièvres

Il existe un très grand nombre de textes et articles sur la question des facteurs d'influence des populations de lièvres, dont certains comprennent de très bonnes revues bibliographiques (Pfister, 1984 ; Fraguglione, 1975 ; Pielowski, 1996 ; Engelhardt et al., 1985). Pfister et al. (2002) font un excellent résumé sur ce sujet, nous le reproduisons ici presque intégralement : « A cause de ses origines d'habitant des steppes, le lièvre brun préfère les terres agricoles ouvertes. Des populations importantes peuvent aussi se développer dans les zones agricoles intensivement cultivées pendant les années avec un climat favorable, bien que les monocultures sur de grandes étendues, avec épandage de pesticides et engrais, ait une influence négative sur l'état de la population. La fragmentation des zones agricoles, par les routes et les zones urbaines, est également défavorable au lièvre. On ne trouve d'ailleurs plus de lièvres sur les petites zones totalement isolées. Une zone de petite taille, mais avec des ressources diversifiées en nourriture, est par contre favorable au lièvre. Le facteur critique pour le lièvre est le moment des récoltes des cultures parce qu'il doit, à ce moment, très rapidement, trouver une nouvelle source de nourriture. Dans les zones agricoles intensives, il souffre également du manque de cachettes. Pour conclure, le climat et les précipitations influencent de façon marquée la dynamique des populations. »

D'autres facteurs jouent évidemment aussi un rôle sur l'évolution des populations de lièvres: la chasse, les pesticides, les parasites (Engelhardt et al., 1985), les maladies ainsi que la prédation (Office national de la chasse, 1995), même si celle-ci est décrite comme un facteur de régulation positif par Lindström et al. (1986). Remarquons à ce sujet que le lièvre, contrairement à une idée largement répandue, n'est qu'une proie secondaire pour le renard (Meia et al.,). Certains auteurs parlent d'un cycle naturel de variation de la population, qu'on observe pour d'autres animaux également, qui aurait chez le lièvre une périodicité de 7 à 10 ans (Pfister et al., 1998 ; Schäfers, 1996). Il n'est pas aisé de déterminer la part des influences de tous ces facteurs, mais, de façon claire, le déclin des populations de lièvres et l'intensification des pratiques agricoles, au début des années '60, apparaissent comme deux phénomènes simultanés, ce qui laisserait penser que 1960 pourrait être une année de référence où l'état du paysage était encore favorable au lièvre. Lorsqu'on parle d'utilisation durable du territoire et des ressources, on fait d'ailleurs référence à 1960 comme de l'état à retrouver (Broggi & Schlegel, 1990).

Différents auteurs ont cherché à établir des corrélations, liens et explications entre les populations de lièvres et les facteurs de l'environnement ou des descripteurs des pratiques agricoles, dont nous ne reproduisons pas ici les résultats (Bresinski, 1976 ; Engelhardt et al., 1985 ; Haller et al., 1997 ; Fraguglione, 1975 ; Meriggi & Alieri, 1987; Nyenhuis, 1998 ; Schäfers, 1996; Schröpfer & Nyenhuis, 1982). Dans la suite de cette étude, nous citerons souvent ces auteurs, mais nous utiliserons essentiellement les résultats de Pfister et al. (2002). Ces auteurs présentent une régression multiple en plusieurs étapes entre les populations de lièvres et les éléments paysagers des zones de comptages de lièvres : Dans la première étape, seules les variables surfaciques sont considérées, tels la surface continue de champs, le relief et la surface en bordure de forêt. Dans une deuxième étape, une régression est effectuée entre le résidu de la première et des variables qui décrivent la qualité des zones de comptages: l'indice d'isolation, la densité du réseau routier, l'humidité des sols, la pluie

printanière et la diversité de l'agriculture. Le résidu de cette deuxième régression est analysé par une troisième régression, dans laquelle les variables explicatives sont les objets semi-naturels, tels les fossés, les vergers haute-tige et les haies. En parallèle avec cette analyse de régression, des entretiens ont été menés par la Station ornithologique avec les chasseurs qui font ressortir les machines agricoles comme la deuxième cause de diminution de population de lièvres, après la diminution de la diversité du paysage.

2.5 Conclusion

Par cet état des connaissances portant sur l'écologie du paysage, sur le paysage lui-même, sur la dynamique du paysage et finalement sur le lièvre en Suisse, nous avons positionné notre recherche dans la multiplicité des notions que regroupent ces termes. Le but était de montrer que le sujet est vaste, qu'il a été déjà largement étudié, qu'un grand nombre de questions subsistent. Nous avons choisi de nous limiter à explorer certaines directions bien que d'autres aient probablement conduit à d'aussi riches découvertes.

Les connaissances acquises et les questions soulevées dans ce chapitre ont contribué à la définition des objectifs particuliers de notre recherche énumérés dans le chapitre 3 « Objectifs ».

Chapitre 3

Objectifs

Nos objectifs peuvent s'exprimer par une série de questions qui précisent le but de notre recherche présenté dans l'introduction (Chapitre 1). Ils ont été définis non-seulement sur la base de la question à l'origine de ce travail, mais également en fonction des connaissances acquises et des questions soulevées par l'état des connaissances (Chapitre 2). Les réponses à ces questions seront apportées par les Chapitres 4 à 7, puis synthétisées dans le Chapitre 8.

Les questions auxquelles nous avons tenté de répondre avec cette recherche sont les suivantes :

- A. Quelles sont les variables clés parmi les variables descriptives du paysage qui traduisent les éléments déterminants pour l'évolution des populations de lièvres ? Les différentes méthodes utilisées (méthodes d'études de dépendances, méthode d'analyse Pegase) sont-elles appropriées pour analyser la relation entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables explicatives du paysage afin d'identifier ces variables clés pour le lièvre ? (→ Chapitre 6)
- B. Quelles dynamiques observe-t-on pour les variables clés ? Ces évolutions sont-elles régulières sur la période d'étude ou montrent-elles des signes d'accélération ou de ralentissement ? Sont-elles uniformes dans la zone d'étude ? Est-il possible d'identifier des groupes de communes qui présentent des dynamiques semblables ? (→ Chapitres 5 et 7)
- C. La régression des populations de lièvres constatée depuis la fin des années '50 est-elle effectivement à mettre en relation avec l'évolution du paysage entre les années '50 et '90, telle qu'elle est décrite avec nos variables clés ? (→ Chapitres 6 et 7)
- D. Est-il possible de déduire un scénario d'évolution du paysage, pour ces prochaines années, à partir des tendances d'évolution observées sur nos variables clés ? Comment les populations de lièvres réagiraient-elles à un tel scénario ? (→ Chapitre 7)
- E. La méthode quantitative descriptive de la dynamique du paysage, développée dans l'ensemble de ce projet de recherche, peut-elle servir de plate-forme méthodologique pour un suivi de l'état socio-économique et écologique du paysage et de sa capacité d'accueil pour le lièvre ? (→ Chapitres 4, 5 et 7)
- F. De façon générale, sans tenir compte de la problématique du lièvre, les données provenant des statistiques communales permettent-elles de décrire le paysage de la partie Nord-Ouest de la Suisse, dans ses aspects « Utilisation du sol », « Pratiques agricoles », « Urbanisation », « Climat », « Morphologie » et « Géographie » ? Sont-elles appropriées à une étude rétrospective ? Sont-elles comparables d'une décennie à l'autre, et donc utilisables pour décrire la dynamique réelle ? Les différentes méthodes utilisées (méthodes statistiques descriptives, ACP, corrélations) sont-elles appropriées pour analyser ces données ? (→ Chapitres 4, 5 et 7)

Chapitre 4

La base de données Paysage

Dans ce chapitre, nous présentons quelle démarche nous avons adoptée pour rassembler les variables nécessaires à notre analyse, dans une base de données « Paysage » : 40 variables « Paysage » décrivant l'état de 936 communes, tel qu'il se présente dans les années '50, '60, '70, '80, et finalement '90.

Cette acquisition des données n'a pas été sans rencontrer des contraintes et des problèmes qu'il a fallu résoudre en faisant des choix. Ceux-ci nous ont parfois amenés à adapter, dans une certaine mesure, nos objectifs, en raison du temps et des efforts à disposition pour cette première étape de notre recherche. Il nous a paru essentiel de surtout veiller à obtenir une base de données de qualité, robuste, dont les éléments correspondent effectivement à la réalité, afin de garantir une interprétation de nos analyses à venir qui permette de répondre à la question posée.

4.1 Méthode: Récolte des données

Nous présentons ici les choix qui ont été faits concernant la période d'étude, la zone d'étude, l'unité spatiale ainsi que sur les variables, sachant que :

- La base de données doit contenir des valeurs reflétant l'état réel, afin de répondre aux questions de la Station ornithologique suisse de Sempach suivantes : comment le paysage agricole suisse a-t-il évolué ? Comment le territoire utilisé comme habitat par le lièvre brun a-t-il évolué ? Est-il possible d'évaluer la qualité du paysage par l'observation de l'état de la population du lièvre brun ? Quelles sont les tendances pour l'avenir ?
- Les variables doivent permettre de décrire les changements du paysage, les causes possibles de ces changements ainsi que certains éléments importants pour le lièvre (état de l'habitat, causes de dérangement de l'animal, causes de mortalité,...).
- Les données doivent être disponibles moyennant un effort raisonnable.

4.1.1 Cadre spatio-temporel

4.1.1.1 Période d'étude

Nous nous intéressons à modéliser les changements majeurs dans l'utilisation du territoire qui ont conduit au paysage actuel, c'est-à-dire la période entre les années '50 et les années '90. En effet, bien que l'évolution ait été importante dès le début du siècle, entre autres à cause du développement des moyens de transports et des machines agricoles qui ont permis à la population de se déplacer et aux agriculteurs d'exploiter les terres avec de meilleurs rendements, c'est à partir du milieu du siècle que la mécanisation et l'exploitation du sol intensive sont apparues, conduisant à la production de masse actuelle. Les deux guerres mondiales ont créé des discontinuités dans l'évolution (Rieder, 1996) qui ne devaient de toute façon pas apparaître dans notre modèle. L'autre raison de se restreindre à la moitié du siècle était que les premières statistiques d'occupation du sol, comparables aux documents actuels, datent de 1952.

Notre base de données décrit cinq états, correspondant chacun à une décennie, depuis les années 50 jusqu'aux années 90. Ce laps de temps, entre deux observations, nous semble adéquat par rapport à la vitesse de changement du paysage observée (voir chapitre 2 « Etat des connaissances »). De plus, la plupart des sources de données sont des relevés effectués à intervalles irréguliers : tous les 10 ou 20 ans pour les statistiques de superficie des sols, tous les 6 ans pour les cartes topographiques. La valeur répertoriée pour une certaine décennie peut, en réalité, dater de n'importe quelle année de cette décennie. Nous avons toujours utilisé le relevé datant de l'année la plus proche du début de la décennie, sans avoir cherché à calculer, estimer ou interpoler les valeurs correspondant exactement aux débuts des décennies (1950, 1960, 1970, 1980 et 1990). Il était en effet plus important de construire une base de données contenant les vraies valeurs, ainsi qu'une indication sur leur

signification exacte et construire des modèles de moindre qualité, plutôt que de construire des modèles plus précis, mais sur la base de données moins fiables. La dynamique de chaque variable est alors reproduite par les cinq valeurs « représentatives » des cinq décennies.

4.1.1.2 Zone d'étude

La zone d'étude couvre la partie Nord-Ouest de la Suisse (Fig.4.1 et Fig.4.2), avec, au centre, le Plateau suisse. Elle recouvre l'habitat potentiel du lièvre brun (Hausser, 1995), et en même temps la partie du territoire suisse où la pression a été la plus forte depuis le milieu du siècle, à cause de son potentiel agricole et de l'importante densité de la population (Broggi & Schlegel, 1990). L'évolution se manifeste par le développement urbain, l'extension du réseau de communications ainsi que l'intensification des pratiques agricoles. Au contraire, dans les vallées alpines, lorsqu'on parle d'évolution, on fait souvent référence au tourisme. Même si le Jura et la partie basse des Préalpes, en dessous de 1'500m d'altitude, ne sont pas le centre de la zone de pression, nous les avons inclus dans la zone d'étude, afin de créer une diversité dans les types de paysages, indispensable pour assurer une certaine représentativité des analyses que nous effectuerons dans cette étude.

Fig.4.1: La zone d'étude de 16'795 km² avec 2128 communes et l'échantillon « Paysage » de 7'988 km² avec 936 communes. (Fonds de carte : OFS GEOSTAT / S+T)

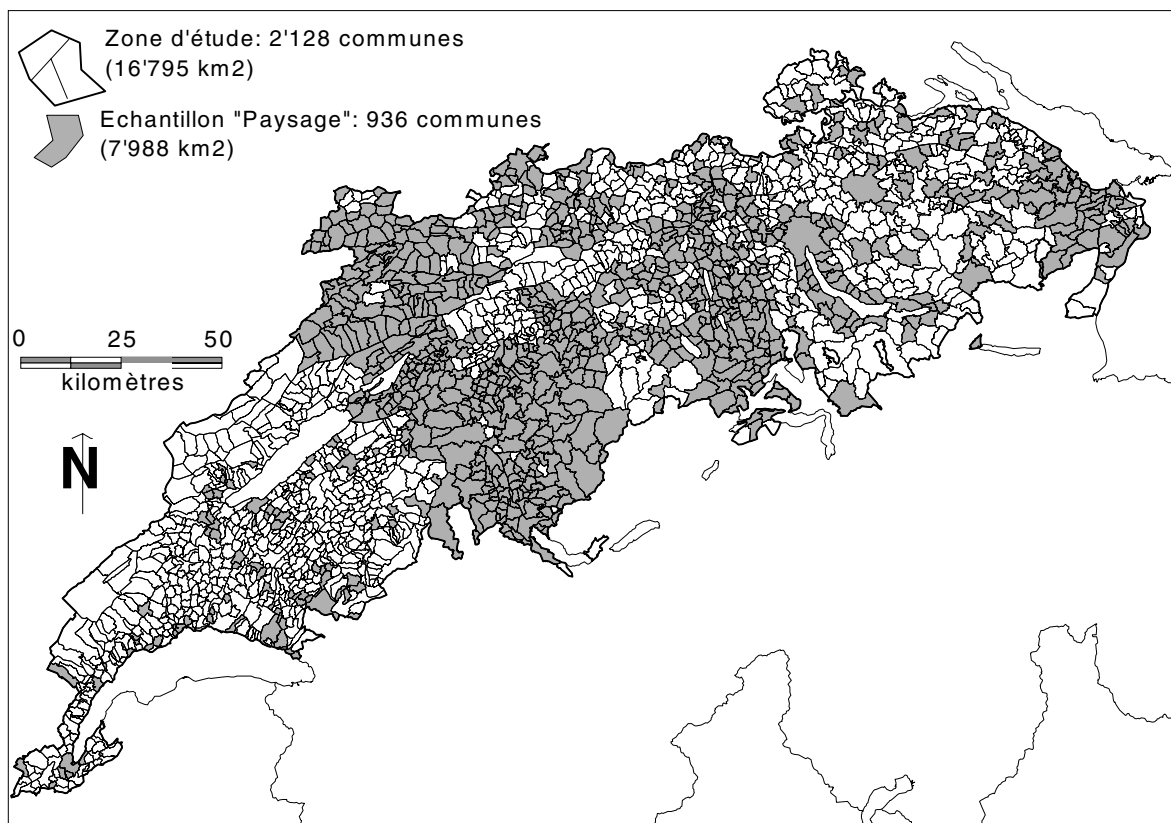
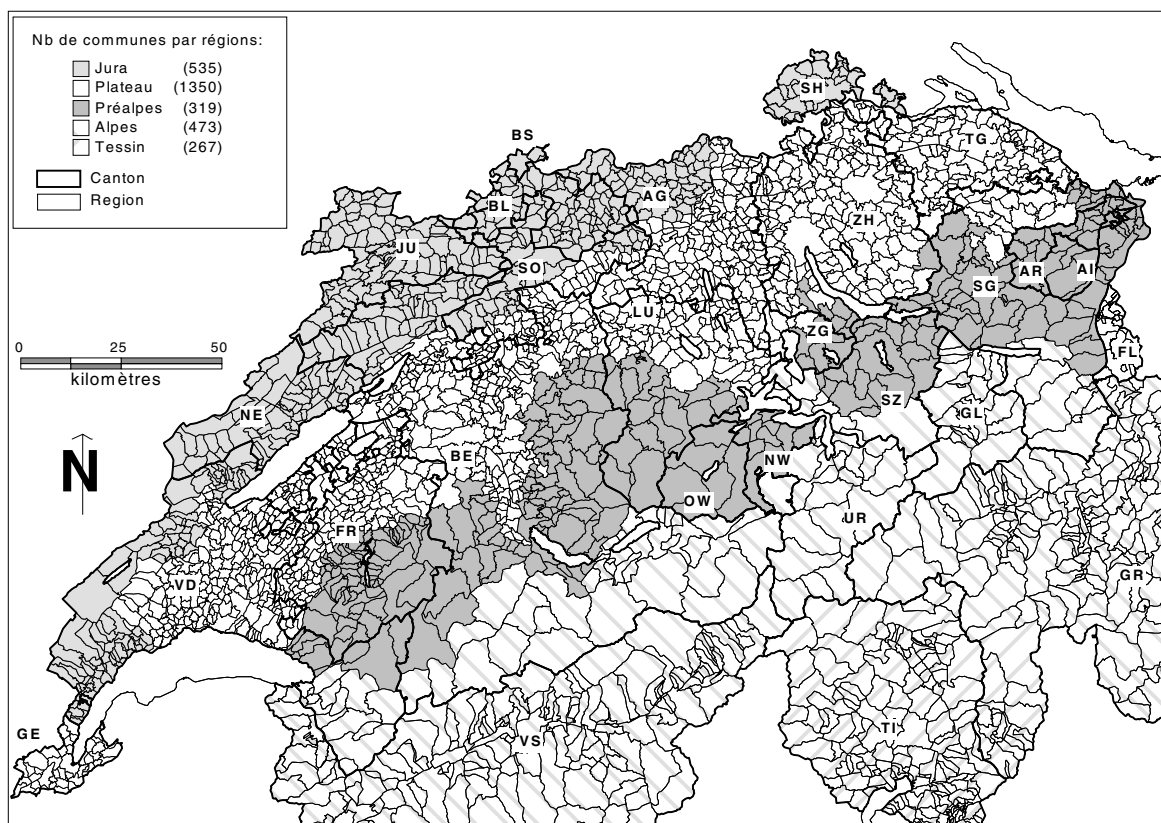


Fig.4.2 : Les 5 régions divisant la Suisse selon l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et les cantons. (Fonds de carte : OFS GEOSTAT / S+T)



Le paysage étudié comprend des zones urbaines, source de forces motrices¹ et d'influences humaines importantes sur l'évolution du paysage, ainsi que des zones rurales, où les changements ont été les plus importants et les plus significatifs du point de vue de la gestion du territoire, de la faune, de la flore et des ressources naturelles. On observe, en même temps qu'une diminution de la surface rurale totale, un changement dans sa composition: apparition de routes, disparition de petits biotopes (paysages restant d'éléments naturels ou semi-naturels, comme des étangs ou des haies), transformation de cours d'eau, agrandissement des champs, modification des pratiques agricoles (Broggi & Schlegel, 1990). Depuis quelques années, pour lutter contre ce mouvement, le concept de « mesures de compensations écologiques » a été introduit. Il s'agit par exemple de mesures de revitalisation, de pratiques agricoles extensives ou encore de jachères (Pfister & Birrer, 1997).

4.1.1.3 Unité spatiale

Les limites communales dans leur état en 1996 seront la base de notre système d'unités spatiales. Elles proviennent de l'OFS/S+T et nous ont été fournies par le service GEOSTAT de l'OFS (voir 4.1.2). La modélisation de la dynamique du paysage nécessite l'observation de certains phénomènes (forces motrices, changement de l'utilisation du sol) à l'échelle appropriée, et leur description sur une unité spatiale bien définie. Celle-ci doit être choisie, non seulement en fonction du système et des relations

¹ Forces motrices : Traduction du terme anglais Driving forces

entre les éléments étudiés, ce que nous avons discuté au début de ce chapitre, mais encore en fonction des types de sources de données à disposition.

Parmi les sources de données énumérées ci-dessous (4.1.2), les plus appropriées, pour répondre à notre objectif de modéliser l'état du paysage, sa dynamique et ses causes, semblent être les inventaires statistiques. Il s'ensuit que l'unité spatiale la plus appropriée est la commune, puisqu'elle constitue la plus petite unité de recensement statistique. Nous avons donc décidé d'orienter notre recherche vers la modélisation des caractéristiques et la répartition spatiale des communes, ce qui implique que l'arrangement des éléments et d'autres microstructures à l'intérieur des communes, comme les biotopes, n'est pas pris en compte.

4.1.1.4 Echantillon

L'échantillon est non aléatoire. Il est constitué de 936 communes sélectionnées de manière ciblée, couvrant 7'988km², c'est-à-dire 47% de la zone d'étude. 18 des 26 cantons suisses sont représentés. Les cantons de Berne et d'Argovie comprennent la moitié des communes de l'échantillon, ainsi que la moitié de la surface d'échantillon, mais seulement 23% en surface de la zone d'étude. Cette sur-représentation dans deux cantons pourrait amener un biais dans l'analyse de cette base de données. Pour le reste, le Tab.4.1 montre que le nombre de communes et les surfaces échantillonnées sont très changeants d'un canton à l'autre. Des 2'128 communes constituant la zone d'étude (voir 4.1.2), les communes retenues sont celles pour lesquelles nous avons pu rassembler des données pour l'ensemble des variables choisies et sur l'ensemble de la période d'étude.

Tab.4.1: Echantillon de la zone d'étude: Répartition des 936 communes et de leurs surfaces par canton. La surface de l'échantillon représente 47% de la zone d'étude et 19% du territoire suisse.

N° Canton	Abréviation	Canton	Echantillon			N° Communes existant de-à
			Nombre de communes	S moyenne [ha]	S totale [ha]	
1	ZH	Zürich	62	1'086	67'303	1-261
2	BE	Bern	337	896	301'922	301-996
3	LU	Luzern	68	911	61'928	1001-1150
5	SZ	Schwyz	7	1'589	11'125	1301-1375
7	NW	Niedwald	3	987	2'962	1501-1511
9	ZG	Zug	5	1'467	7'333	1701-1711
10	FR	Fribourg	20	654	13'079	2001-2336
12	BS	Basel-Stadt	3	1'227	3'681	2701-2703
13	BL	Basel-Landschaft	65	611	39'747	2801-2895
14	SH	Shaffhausen	6	911	5'464	2901-2974
15	AR	Appenzell A.Rh.	13	821	10'668	3001-3038
16	AI	Appenzell I.Rh.	3	1'976	5'927	3101-3111
17	SG	St. Gallen	39	1'266	49'371	3201-3444
19	AG	Aargau	147	602	88'474	4001-4323
20	TG	Thurgau	25	1'035	25'865	4401-4954
22	VD	Vaud	58	460	26'656	5401-5939
25	GE	Genève	6	631	3'788	6601-6645
26	JU	Jura	69	1'065	73'464	6701-6806
Echantillon			936	853	798'757	8-6806
Zone d'étude			2'128	789	1'679'495	
Suisse			2'983	1'384	4'129'811	1-6806

Nous avons fait un premier tri extrêmement sélectif de communes, pour ne conserver que les communes totalement mesurées par l'Office fédéral de la statistique dans les années '50 et '70 (1'272

communes sur un total de 3'100 que comprenait la Suisse en 1952, 1'356 sur 3'081 en 1972). Seules ces communes offrent des relevés d'utilisation du sol, dont certaines catégories sont essentielles dans notre étude, tel que les variables « Zone urbaine », « Route et rail » et « Forêt ». Comme deuxième tri, nous avons éliminé les communes dont les limites ont changé de façon importante, entre les années '70 et '90, suite à une division ou un regroupement de communes (canton de Thurgovie) ou encore suite à un changement de canton (le canton du Jura qui s'est séparé du canton de Berne en 1979), sauf lorsqu'il était possible de leur attribuer des valeurs correspondant à l'état de base (les limites communales de l'OFS/S+T en 1996), par addition de valeurs de plusieurs communes par exemple. Quelques communes isolées ont subi des modifications de ce type, comme par exemple #4646 Ermatingen : les valeurs que nous avons relevées en '50, '60 et '70 sont celles d'Ermatingen et de Triboltingen, commune voisine englobée par la première en 1975. Ces modifications sont répertoriées dans l'Annexe 4.1. Les communes qui présentent des variations de surfaces de moindre importance d'une décennie à l'autre, pour des raisons qui nous sont restées inconnues, ont été conservées dans l'échantillon. Nous avons considéré la surface communale comme une variable qui peut évoluer dans le temps, et donc relevé 5 valeurs, une pour chaque décennie.

A cet échantillon, 12 communes des cantons de Lucerne et St-Gall ont été ajoutées, afin de couvrir deux zones sur lesquelles la Station ornithologique suisse de Sempach a entrepris de tester des mesures de compensations écologiques (bandes herbeuses, haies, friches, etc...). Les surfaces de zones urbaines, routes et rails et forêts qui figurent dans Tab.4.2 ont été digitalisées à partir de cartes topographiques suisses des années '50 et '70 au 1 :25'000, puis ajustées à l'aide d'un échantillon sur lequel ces surfaces sont connues (Annexe 4.2).

Tab.4.2: Eléments digitalisés sur les 12 communes de LU et SG pas entièrement mesurées par les statistiques fédérales en 1952 et 1972. #1133 Kottwil et #3254 Oberriet ont été mesurées par les statistiques fédérales en 1972.

Numéro #	Commune	Canton	Zone urbaine		Forêt		Route&rail	
			[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
			'50	'70	'50	'70	'50	'70
1089	Knutwil	LU	42.5	61.0	407.3	363.3	17.1	23.6
1091	Mauensee	LU	27.4	31.5	206.8	239.0	14.6	20.4
1127	Egolzwil	LU	24.6	36.7	174.2	177.9	13.9	18.7
1133	Kottwil	LU	22.1		206.1		9.1	
1143	Schötz	LU	60.6	103.7	351.2	362.5	12.3	15.9
1146	Wauwil	LU	27.4	47.3	46.2	58.5	9.3	11.7
3251	Altstätten	SG	320.4	461.6	1'383.5	1'410.0	78.5	80.5
3232	Balgach	SG	56.1	138.1	216.0	236.6	8.0	7.5
3243	Diepoldsau	SG	71.2	158.9	67.8	76.0	12.8	20.0
3253	Marbach	SG	21.1	46.4	20.2	29.2	9.4	11.3
3254	Oberriet	SG	107.1		1'708.0		49.9	
3255	Rebstein	SG	47.8	95.9	45.4	55.6	8.2	10.3

L'objectif principal de sélection des communes est d'obtenir une certaine homogénéité dans la qualité des données pour une bonne comparabilité. Un certain risque de subjectivité en découle (Skanes 1996), car notre échantillon n'est ni statistiquement représentatif de la zone d'étude (Tab.4.1), ni distribué géographiquement uniformément (Fig.4.1).

4.1.2 Sources des données

Nous avons récolté le plus grand nombre possible de critères sur la plus petite unité spatiale commune, ceci sur la totalité de la zone d'étude. Les données devaient être disponibles depuis 1950 jusque dans les années '90. Elles proviennent essentiellement de :

- Inventaires statistiques, distribués sous forme de cahiers ou informatisée. L'Office fédéral de la statistique (OFS) ainsi que de nombreux autres organismes ayant à faire avec l'utilisation du sol ou des ressources ont, depuis plus d'un siècle pour certains, récolté un grand nombre de données aux échelles communales, régionales, cantonales ou fédérale. Il existe également des statistiques de critères de type socio-économiques et politiques. Ces inventaires ont plusieurs limites importantes :
 - Ils ne sont parfois pas homogènes sur toute la période d'étude, ce qui demande un travail préliminaire de rectification: changement de définition entre deux inventaires successifs, changement de méthode (unité spatiale, intervalle de temps, unité), abandon du relevé d'un critère.
 - Ils concernent la commune alors qu'un niveau spatial plus fin serait plus adéquat.
 - Les relevés informatisés ne concernent que les années les plus récentes et sont pauvrement documentées (références, définitions), ce qui ne nous permet pas de les comparer avec des inventaires sur papier sans vérification préalable.
- Inventaires statistiques, distribués sous forme SIG par le service GEOSTAT de l'Office fédéral de la statistique (OFS) (OFS, 1996). GEOSTAT propose une base de données de type SIG, contenant des données représentées par des points (p.ex. coordonnées des centres des communes), une trame de points (p.ex. utilisation du sol), une trame (p.ex. population par hectare), des lignes (p.ex. réseau hydrologique) ou des polygones (p.ex. limites des communes, lacs). Pour plus de détails, voir (OFS, 1993) et (OFS, 1994). Les valeurs des trames de points et des trames (grille hectométrique) ainsi que les valeurs des points peuvent être agrégées sur des unités spatiales plus étendues que l'hectare, par exemple sur une commune, un district, un canton ou l'ensemble du pays, mais ceci implique des hypothèses et erreurs méthodologiques que nous discuterons plus loin (voir 4.1.3.5). Dans la suite de ce travail, nous désignerons par « Données de GEOSTAT » ces données de l'OFS distribuées par le service GEOSTAT.
- Cartes topographiques. Nous avons utilisé cette source de données pour compléter des trous dans les séries de données. De ces cartes, les données physiques, géomorphologiques et de couverture du sol peuvent être extraites. Le nombre de cartes à l'échelle 1:25'000 nécessaires pour couvrir notre échantillon est trop important pour que cette source de données soit utilisée autrement que comme complément à d'autres documents.

Bien qu'il soit fréquent d'utiliser des photos aériennes pour étudier l'évolution du paysage (Turner & Ruscher, 1988), (Skane & Bunce, 1996), l'utilisation des photos aériennes noir/blanc s'est révélée être inappropriée pour cette recherche. Un essai de description du paysage de la plaine du Wauwilermoos (LU) en 1990 a été effectué dans une étape préliminaire (Gilliéron, 1999), avec comme

conclusion que la récolte et la digitalisation de photos « noir et blanc » demande un investissement en temps trop important lorsqu'il s'agit de couvrir entièrement une zone de la taille de notre échantillon de 936 communes. Cette technique permet d'affiner une étude de ce type en analysant plus en détail un sous-échantillon.

4.1.3 Variables « Paysage »

4.1.3.1 Choix des variables

Nous avons choisi 28 variables, décrivant 6 types d'attributs (Tab.4.3). Notre premier critère de choix était la capacité de décrire l'état du paysage, à une époque, comme les surface de différentes utilisations du sol, ainsi que la capacité de traduire des causes possibles de l'évolution du paysage entre deux époques, comme la distance à l'agglomération la plus proche, la population, le climat ou encore la somme accordée comme subventions pour des améliorations foncières. Le deuxième critère était la disponibilité des données : nous n'avons retenu que les variables pour lesquelles les séries temporelles sur l'échantillon étaient aussi complètes que possible. La variable « Indice d'abondance de lièvres » sera introduite dans le chapitre 6 « Le lièvre et le paysage ».

Le choix des variables est évidemment un point crucial de cette recherche, bien que la liste ci-dessous puisse être modifiée et complétée ultérieurement. Phipps (1969) pose deux questions, dont il faut tenir compte, pendant le processus de choix des variables d'une base de données, ainsi que lors de l'analyse de cette base de données : l'information réunie par ces variables représente-t-elle totalement la variation possible de la variable cible (la variable cible étant la variable choisie pour décrire l'objet étudié) ? Le phénomène étudié est-il vraiment significatif pour l'objet étudié ? Skanes (1996) ajoute que le processus d'évaluation de la qualité du paysage doit être fait sur la base de critères aussi objectifs que possible afin de minimiser et contrôler la subjectivité.

Ci-dessous, nous présenterons succinctement ces variables. Une description complète se trouve dans l'Annexe « Bd & Variables », sur un CD.

*Tab.4.3: 28 variables de 6 types. Les variables avec un * n'ont pas de valeurs communales, mais des valeurs cantonales. Les variables avec un ** sont invariantes dans le temps. En italique : Variables qui correspondent le mieux à une partie des variables utilisées par la Station ornithologique suisse de Sempach (voir (Pfister et al., 2002) pour la totalité).*

Utilisation du sol	Pratiques agricoles	Urbanisation	Climat	Morphologie	Géographie
<ul style="list-style-type: none"> •(Surface communale (SC)) •Zone urbaine •Route&rail •Route nationale •Forêt •Surface agricole utile (SAU) •Terre ouverte (TO) 	<ul style="list-style-type: none"> •Maïs •Verger intensif •Taille moyenne parcelles •Vache •Lait * •Main-d'œuvre •Tracteur •Subvention AF * •Sol défavorable 	<ul style="list-style-type: none"> •Agglomération appartenance •Agglomération taille •Agglomération distance •Bâtiment •Population •Voiture 	<ul style="list-style-type: none"> •Pluie10 •Jours Précipitation** •Jours T>5°C** 	<ul style="list-style-type: none"> •Altitude médiane** •Relief** •Pente < 17%** 	<ul style="list-style-type: none"> •Position**

4.1.3.2 Variables primaires

Les variables primaires sont formées des valeurs brutes tirées des documents sources. Les unités indiquées sont celles données par les documents sources.

A) Utilisation du sol

« **Zone urbaine** » [ares] montre le taux d'urbanisation de la commune. Les zones urbaines génèrent des contraintes et des pressions importantes sur le paysage rural. On peut considérer que cette zone, de densité construite variable, est inutilisable ou inaccessible pour la faune sauvage, mis à part pour certaines espèces, comme le renard, qui ont su s'adapter à ce milieu.

« **Route & rail** » [m²] et « **Route nationale** » [m] donnent une idée du morcellement du territoire par le réseau des voies de communication. Ces barrières linéaires sont souvent peu perméables au passage de la faune. Elles provoquent également des difficultés pour les agriculteurs lorsqu'elles morcellent leurs domaines. Ce nouvel état des lieux a conduit à la construction d'aménagements spéciaux pour les franchir (ponts, tunnels). On peut se demander si les routes facilitent les déplacements et induisent une augmentation du trafic ou si c'est le contraire, comme dans la question de la poule et de l'œuf...

« **Forêt** » [ares] est une utilisation du sol relativement stable depuis un peu plus d'un siècle parce que son exploitation a été légiférée dès le début du XX^e siècle². Une forte évolution, entre deux décennies, sera donc probablement le reflet d'un événement important. Cette stabilité générale donne à la forêt une fonction de réservoir de ressources et d'espace, que les haies et autres bois au milieu des terres agricoles n'ont pas, car ils risquent plus facilement d'être remplacés par des cultures ou des aménagements divers. Les forêts contribuent à la protection des biotopes par leur surface souvent importante, qui permet à des surfaces proches de l'état naturel de s'y développer, telles que des lisières (Broggi & Schlegel, 1990). La qualité des forêts a par contre probablement évolué avec le temps: structure, biodiversité, lisière, type de gestion, position dans le réseau d'éléments naturels et semi-naturels permettent d'évaluer cette caractéristique. Malheureusement, les statistiques fédérales ne comportent aucun indicateur de cet aspect, ce qui veut dire qu'il existe un risque de surévaluation de la qualité écologique des communes avec de grandes surfaces de forêts mais de pauvre qualité, exploitées intensivement ou cernées par des zones urbaines, en comparaison avec des communes avec de plus petites surfaces de forêts mais de meilleure qualité. La forêt ne fait pas partie de la « **Surface Agricole Utile** » (**SAU**) [ha], qui inclut toutes les autres surfaces productives, par exemples les céréales, pâturages, prairies, vergers, vignes. « **Terre ouverte** » (**TO**) [ha] est la partie de SAU qui est labourée, c'est-à-dire la SAU sans les pâturages, prairies, vergers et vignes. Ces terres sont souvent situées sur des sols fertiles, avec une topographie relativement plate et à une altitude pas très élevée.

² Loi fédérale du 11.10.1902 concernant la Haute surveillance de la Confédération sur la police des forêts, devenue par la suite la Loi fédérale sur les forêts (LFo), 1991.

B) Pratiques agricoles

Le caractère intensif d'une exploitation agricole augmente avec le « **Nombre de tracteurs** » [nb]. Cette mécanisation s'accompagne d'une diminution de la main-d'œuvre nécessaire, mais ce « **Nombre de main-d'œuvre** » [nb] reflète également le type de culture pratiqué, nécessitant plus ou moins de travail non-mécanisé. La « **Production de lait** » [Kg/vache/an] d'une vache dépend de la qualité de l'herbe avec laquelle elle a été nourrie, qui, elle, est liée à l'intensité des pratiques agricoles: une prairie intensive, qui donne un meilleur rendement de lait, est fauchée 3 à 6 fois par année, pâturée jusqu'à 7 fois par an et reçoit des engrais régulièrement, alors qu'une prairie extensive est fauchée une fois par année tardivement, éventuellement pâturée en automne et ne reçoit pas d'engrais (SRVA, 1997). « **Surface de maïs** » [m²] et « **Surface de verger intensif** » [m²] (haute-tige) sont également des indicateurs de l'intensité des pratiques agricoles. « **Nombre de vaches** » [nb] apporte une indication sur la part de pâturages dans le paysage.

La « **Taille moyenne des parcelles** » [ares] indique s'il y a eu un remaniement parcellaire (augmentation de la taille des parcelles) ainsi que son efficacité. Les surfaces mesurées par cette variable sont des surfaces administratives, invisibles dans le terrain. Une parcelle peut être cultivée en plusieurs champs de types différents. Il aurait été plus intéressant de connaître la taille moyenne des champs pour décrire le morcellement du paysage, le type d'exploitation agricole et, par conséquent, également la diversité des ressources pour la faune vivant dans le milieu agricole. Les statistiques ne donnent malheureusement pas cette valeur et l'extrapolation de ces surfaces, à partir de photos aériennes, est trop hasardeuse. On peut toutefois admettre que la taille moyenne des champs n'excède en aucun cas la taille moyenne des parcelles.

« **Subvention AF** » [CHF/an] est le montant accordé par canton, pondéré par la surface de la commune, pour les travaux d'améliorations foncières (remaniements parcellaires, constructions de routes agricoles, corrections de cours d'eau et autres aménagements) et traduit les efforts entrepris pour que l'agriculture devienne plus rentable, donc probablement plus intensive. Ces travaux provoquent également des modifications de la structure du paysage, avec la construction de nouvelles routes et l'agrandissement des parcelles. En principe, chaque commune ne devrait avoir entrepris des travaux de ce type qu'une fois au cours de notre période d'étude. Comme ces aménagements ont eu lieu d'abord dans les communes situées en plaine (là où les rendements agricoles ont été augmentés en premier), les subventions accordées à un canton, au début de la période d'étude, sont allées préférentiellement vers celles-ci, alors que les subventions accordées par la suite sont allées aux communes avec des rendements agricoles moins favorables, par exemples, celles du Jura et des Préalpes. Nous n'avons pas pu tenir compte de ce phénomène, et n'avons pu que distribuer la somme totale de chaque décennie à chaque commune en fonction de sa surface communale.

Finalement, « **Surface de sol défavorable** » [ha] mesure la surface de terres défavorables à la culture parce que relativement humides et imperméables, exploitées en prairies, parfois en pâturages, mais peu souvent en cultures céréalières.

C) Urbanisation

Les trois variables relatives aux agglomérations³ (« **Agglomération appartenance** » [oui/non], « **Agglomération taille** » [ha] et « **Agglomération distance** » [m]) montrent l'influence et l'intensité des échanges entre les agglomérations et les communes qui en font partie ou avoisinantes. En effet, plus la commune se trouve proche d'une agglomération, plus le trafic et l'utilisation du sol seront importants. De plus, plus l'agglomération est grande, plus son influence sur les alentours est forte. On peut s'attendre à ce que les communes qui font partie d'une même agglomération montrent des évolutions parallèles ou similaires.

Le « **Nombre de bâtiments d'habitation** » [nb] et la « **Population** » [nb] sont des indicateurs de l'intensité de l'utilisation du territoire, de la pression humaine et des activités non agricoles dans les zones rurales. Les statistiques répertorient le nombre total de bâtiments d'habitation, qu'ils se trouvent dans les zones urbaines ou dans les zones agricoles. Il aurait été encore plus intéressant de connaître le nombre de bâtiments uniquement hors des zones urbaines, afin de qualifier l'intensité de l'utilisation du territoire rural qui devient de plus en plus forte : depuis 1980, un tiers des bâtiments résidentiels se construisent en zone rurale (OFS, 2001). Le « **Nombre de voitures de tourisme** » [nb] reflète également cette pression sur la zone rurale : les voitures, comme la population, sont concentrées dans les centres urbains, ce qui également provoque des concentrations de nuisances. Les déplacements vers l'extérieur et vers l'intérieur de la ville impliquent obligatoirement un trafic important aux alentours de la zone urbaine. Le trafic, à l'extérieur des zones urbaines, n'est pas non plus négligeable, sachant que le nombre de voitures par habitant est plus élevé en campagne qu'en ville.

D) Climat

La partie nord-ouest de la Suisse est divisée en plusieurs zones avec des climats spécifiques. La « **Pluie10 moyenne annuelle** » [mm/an], le « **Nombre de jours avec précipitation** » (de plus de 1mm par jour) [nb jours/an] et le « **Nombre de jours avec une température supérieure à 5°C** » [nb/an] devraient permettre de montrer des différences spatiales significatives. La pluie annuelle [mm/an] est une mesure importante pour apprécier le potentiel de culture et choisir le type de culture adéquat. Elle est très variable d'une année à l'autre, mais aucune tendance significative n'a été observée entre 1901 et 1997 par Rebetez (1999). Afin de lisser ces différences d'une année à l'autre, nous avons considéré la moyenne des pluies annuelles des 10 années précédentes. Le « **Nombre de jours avec précipitation** » [nb/an] peut être important pour le lièvre brun dont les populations semblent souffrir des intempéries (Engelhardt et al., 1985). En Suisse, cette valeur ne montre pas de tendance d'évolution sur la période 1901-2000 à la station de Neuchâtel (voir Annexe « Bd & Variables », Description des variables, Fig 1a et 1b). Les valeurs moyennées sur un intervalle de 10 ans entourant l'année considérée se distribuent par intermittence au-dessus et au-dessous de la

³ Rappelons que le concept d'agglomération se définit, de façon simplifiée, comme une réunion de communes totalisant au moins 20'000 habitants, présentant un lien morphologique ou fonctionnel avec la zone centrale et une marque économique ou sociale de l'urbain Schuler et al. (1997) (voir également chapitre 2 « Etat des connaissances », paragraphe 2.3.2).

moyenne (par exemple 124.2 jours/an à Neuchâtel). Ces observations nous permettent de considérer la valeur moyenne calculée sur les observations relevées sur la période 1901-1960 relevée par les stations pluviométriques par l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) dans le bulletin de 1987 (valeurs consignées dans l'Annexe « Bd & Variables », Description des variables, Fig.3). Le « **Nombre de jours avec une température supérieure à 5°C** » [nb jours/an] donne une indication du développement de la végétation: Il n'y a pas de photosynthèse pour la plupart des plantes en dessous d'une température limite appelée température de végétation nulle et la différence cumulée entre la température moyenne du jour et la température de végétation nulle est appelée « nombre de degrés-jours ». En Suisse comme au Canada, on considère que cette température limite est de 5°C (communication personnelle de A. Fischlin, Institut für Terrestrische Oekologie, ETHZ). Il semblerait que la température moyenne ait été relativement constante entre 1950 et 1980, avant d'augmenter de façon significative, ce qui se vérifie sur la station de Neuchâtel (Annexe « Bd & Variables », Description des variables, Fig.2a). Nous faisons l'hypothèse qu'il n'est pas nécessaire de tenir compte de cette augmentation dans notre étude de la dynamique du paysage en fonction du lièvre pour les raisons suivantes : (1) Comme elle ne débute que dans les années '80 et que la variation de la population du lièvre a un cycle naturel de périodicité de 7 à 10 ans (voir chapitre 2 « Etat des connaissances ») son influence ne serait visible qu'à partir des années '90, la dernière décennie de notre période d'étude; (2) Cette évolution ne peut être que bénéfique aux populations de lièvres, cet animal appréciant un climat clément (voir chapitre 2 « Etat des connaissances »), alors que les statistiques de chasse et les comptages de lièvres montrent un état des populations de lièvres plus bas que jamais. Nous avons donc calculé une valeur moyenne sur la période 1960-1990 (par exemple 204.5 jours/an à Neuchâtel, voir Annexe « Bd & Variables », Description des variables, Fig.2b et 3), cette période comportant des relevés sur toutes les stations climatologiques couvrant notre zone d'étude.

Le nombre de jours annuels de précipitation ainsi que le nombre de jours avec une température moyenne supérieure à 5°C, deux paramètres climatiques très variables d'une année à l'autre, ont été répertoriés sous les noms « **Jours Précipitation_2** » et « **Jours T>5°C_2** » et utilisés dans notre Analyse en Composantes Principales (voir chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et sa dynamique »). Ils ont été remplacés par les valeurs moyennes constantes dans les temps « **Jours Précipitation** » et « **Jours T>5°C** » pour les autres analyses.

E) Morphologie

Les critères morphologiques sont invariants dans le temps, mais pas moins importants: Jusqu'au milieu de XX^e siècle, les types de culture étaient choisis en premier lieu en fonction de la qualité des terres, traduite ici par « **Surface de sol défavorable** » [ha], de la pente (« **Surface avec pente inférieure à 17%** » [ha]), de l'exposition au soleil et de l'altitude (« **Altitude Médiane** » [m]). « **Relief** » [m], la différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas, est une mesure supplémentaire de la topographie. Plus tard durant le XX^e siècle, les tracteurs, les systèmes de drainage et les engrais ont permis de cultiver des terres moins favorables. A partir de 1980 apparaît un phénomène de déprise agricole, visible par une diminution de 3,1% de la SAU sur toute la Suisse, mais qui, étonnamment, ne se fait pas que sur des terrains défavorables : il s'agit, pour les deux tiers,

de prés et de terres arables fertiles ainsi que de plantations d'arbres de hautes tiges situés en plaine, en des lieux peu accidentés, donc faciles à cultiver, qui cèdent la place à de nouvelles surfaces d'habitat et d'infrastructure. Seul le dernier tiers se trouve dans des lieux moins propices aux cultures, pentus, isolés et où des prés et des pâturages en friche sont en voie de reboisement (OFS, 2001).

F) Géographie

Nous avons défini une variable positionnant les communes dans la Suisse. (Phipps, 1969) considère, en effet, qu'il manque toujours des critères pour expliquer totalement le système étudié et qu'une variable supplémentaire permet de révéler un phénomène inconnu à priori: « **Position** » [km], la distance par rapport à Genève, une commune à l'extrémité sud-ouest de la zone d'étude, pourra peut-être révéler un phénomène, par exemple, politique, sociologique ou climatique, avec un gradient orienté du sud-ouest au nord-est.

« **Surface communale** » (**SC**) [ha] est l'unité spatiale de la base de données. Elle sera utilisée comme surface de référence, c'est-à-dire que les variables relatives à une surface seront rapportées à cette surface. Ce système de référence spatial montre des inexactitudes pour certaines variables à certaines époques:

- Dans le cas où une variable est formée de données raster provenant de la base de données GEOSTAT, la valeur attribuée à une commune est la somme des valeurs des points hectométriques inclus dans le territoire communal. Mais le contour de la zone décrite par les carrés décrits par les points d'échantillonnage ne correspond pas exactement à la limite communale.
- Les statistiques des années '50 et '60 concernant les pratiques agricoles et les types de culture (« SAU », « Terre ouverte », « Maïs », « Verger intensif », « Vache », « Main-d'œuvre » et « Tracteur ») inventorient pour une commune les parcelles qui appartiennent aux agriculteurs établis dans cette commune, même si certaines parcelles se trouvent sur le territoire d'une autre commune (Bureau fédéral de statistique, 1959, p. 9*; Bureau fédéral de statistique, 1976, p.7). Au contraire, les parcelles cultivées par un agriculteur, établi sur une autre commune, ne seront pas répertoriées. Ceci constitue une source d'inexactitudes importantes pour notre recherche, en particulier pour les petites communes où les domaines agricoles sont souvent très morcelés. Ainsi, ces surfaces, telles qu'elles sont répertoriées dans notre base de données, peuvent laisser croire qu'il y a eu un changement dans le paysage, alors qu'il ne s'agit que d'un changement de propriété des parcelles. Ceci pourrait également expliquer pourquoi certaines communes annoncent à chaque décennie une SAU plus grande que leur surface totale, par exemple #401 Aeffligen (+12 à +20%), #498 Müntschemier (jusqu'à +15%), #665 Gurbrü (+10 à +23%), #755 Worben (+12 à +31%), #2031 Montbrelloz (jusqu'à +22%). Dans d'autres cas, ces incohérences n'apparaissent qu'à certaines décennies, par exemple #874 Lohnstorf dans les années '70, '80 et '90 (jusqu'à +14%).

D'autres critères auraient été évidemment du plus grand intérêt pour analyser les facteurs d'influence de la dynamique du paysage. Leur détermination et leur acquisition pourraient faire l'objet d'une recherche en soi. Nous citons, ici, quelques exemples de toutes les variables que nous avons imaginées, avant de les laisser de côté: Quantité d'engrais, Nombre de champs par exploitation agricole, Investissements pour la construction des routes, Surfaces cultivées sous serres ou tunnels, Subventions pour machines et équipements, Subventions pour l'agriculture, Nombre d'heures de travail hebdomadaire par exploitation agricole, Distances parcourues par les travailleurs pendulaires. Pour combler ces trous importants, nous aurions dû appliquer différentes méthodes, parfois même combiner échantillonnages, enquêtes, extrapolations, interprétations de photos aériennes et de cartes nationales, etc.

4.1.3.3 Variables rapportées⁴

Parmi les variables primaires, celles donnant une quantité (nombre ou surface) d'un élément par commune doivent être exprimées de façon relative afin de tenir compte de la taille des communes. Dans un premier temps, ces variables seront rapportées à la surface communale totale (SC) et exprimées en [unité de la variable primaire/ha] (Tab.4.4.(B)). Dans un deuxième temps, les variables primaires seront rapportées aux surfaces concernées le cas échéant (Tab.4.4.(C)) et exprimées en [unité de la variable primaire/ha]. Les surfaces concernées sont, selon les cas la surface agricole utile (SAU), la surface en terre ouverte (TO), ou encore la surface agricole utile non terre ouverte (SAU-TO). Cette dernière inclut les prairies, pâturages, vergers et vignes.

Les variables qui n'expriment pas une quantité en fonction de la taille des communes, restent sous la forme de variables primaires (Tab.4.4. (A)).

⁴ Variable rapportée : terme que nous utiliserons pour décrire une variable dérivée par rapport à une surface de référence. Ce terme « dérivé » prêtant à confusion avec la dérivée d'une fonction mathématique, nous préférons ne pas l'utiliser dans ce texte.

Tab.4.4: Les 11 variables primaires (A) et les 29 variables rapportées à: (B) la surface communale totale (SC) ; (C) la surface agricole concernée : Surface agricole utile (SAU), Terre ouverte (TO) ou Surface agricole utile non terre ouverte (SAU-TO). (SAU-TO inclut les prairies, pâturage, vergers et vignes).

	Variables primaires (A)	Variables rapportées (B) "Var. primaires / SC"	Variables rapportées (C) "Var. primaire / SAU, TO, (SAU-TO)"
1	Agglomération Appartenance [oui/non]		
2	Agglomération Distance [m]		
3	Agglomération Taille [ha]		
4		Bâtiments (d'habitation) [nb/ha]	
5		Forêt [ares/ha]	
6	Lait [Kg/vache/an]		
7		Main-d'œuvre [nb/km ²]	Main-d'œuvre/SAU [nb/km ²]
8		Maïs [m ² /ha]	Maïs/SAU [m ² /ha] Maïs/TO [m ² /ha]
9	Pluie10 (moyenne 10 ans) [mm/an]		
10		Population [nb/ha]	Population/SAU [nb/ha]
11		Route&rail [m ² /ha]	Route&rail/SAU [m ² /ha]
12		Route nationale [m/ha]	Route nationale/SAU [m/ha]
13		Surface agricole utile «SAU» [ha/ha]	
14			Subventions AF/SAU [CHF/ha/an]
15	Taille parcelles (moyenne) [ares]		
16		Terre ouverte «TO» [ha/ha]	Terre ouverte/SAU «TO/SAU» [ha/ha]
17		Tracteur [nb/ha]	Tracteur/SAU [nb/ha]
18		Vache (laitière) [nb/ha]	Vache (laitière) /SAU [nb/ha] Vache (laitière) /(SAU-TO) [nb/ha]
19		Vergers intensifs [m ² /ha]	Vergers intensifs/SAU [m ² /ha]
20		Voiture (tourisme)[nb/ha]	Voiture (tourisme)/SAU [nb/ha]
21		Zone urbaine [ares/ha]	
22	Altitude médiane [m]		
23		Pente <17% [ha/ha]	
24	Position (distance de Genève) [km]		
25	Relief (différence d'altitude max) [m]		
26		Sol défavorable [ha/ha]	
27	Jours Précipitation (moyenne sur 1901-1960) [nb/an]		
28	Jours T>5°C (moyenne sur 1960-1990) [nb/an]		
tot	11	16	13

4.1.3.4 Estimation des valeurs manquantes

Afin d'avoir une base de données avec un nombre d'unités suffisant pour des analyses statistiques, nous avons comblé les trous et remplacé les valeurs fausses ou inexactes, lorsque ceci s'est avéré possible sans risque d'introduction d'erreur importante. Bien que des méthodes statistiques existent pour estimer des valeurs manquantes dans des séries, nous avons choisi, d'examiner chaque série à compléter cas par cas (pour les détails, voir Annexe 4.3), selon les graphiques d'évolution des variables de 50 communes test (voir chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et sa dynamique ») :

- Cas n°1 : Le graphique d'évolution de la variable montre des types d'évolution similaires pour la majorité des communes. Les valeurs manquantes sont calculées en reproduisant l'évolution moyenne observée sur les communes sans lacunes. Exemple: « Lait ».
- Cas n°2 : Les valeurs de « Zone urbaine » et de « Route&rail » pour '90 manquent sur 32 communes qui n'ont pas encore été intégrées dans la base de données GEOSTAT. Nous avons digitalisé ces surfaces sur les cartes nationales (1:25'000) des années '80 et '90. Les différences entre les deux décennies sont ensuite corrigées selon l'ajustement calculé dans l'Annexe 4.2. Les résultats figurent dans l'Annexe 4.4. Les informations qualitatives sur les tendances réelles et les prévisions des offices communaux et cantonaux n'étaient pas assez précises pour en tirer des taux d'évolution que nous aurions pu appliquer aux valeurs '80.
- Cas n°3 : Il manque les valeurs pour « Forêt » en '90 sur 32 communes qui ne sont pas encore intégrées dans GEOSTAT : les différences entre '80 et '90 ont été déduites à partir des cartes reproduites dans l'inventaire national des forêts de 1986 et 1995 (Mahrer, 1988).
- Cas n°4 : Seules certaines communes ont un trou dans une série temporelle. Les valeurs manquantes sont calculées en appliquant les évolutions moyennes observées sur les unités sans trou du même district. Cette méthode fait ressortir les tendances régionales, ce qui peut être intéressant. D'un autre côté, une erreur peut être introduite dans le cas, fréquent, où le district n'est pas homogène (par exemple une commune urbaine entourée de communes rurales). Exemples : « Zone urbaine » en '70, « Route&rail » et « Taille parcelle » en '80 et en '90, « Bâtiment » en '70, '80 et '90.
- Cas n°5 : Il manque les valeurs pour tout l'échantillon pour une décennie. Comme il n'y a, dans ce cas, pas de valeurs auxquelles se référer, la seule façon de ne pas introduire de fausses données est de calculer les valeurs moyennes entre les deux décennies adjacentes pour chaque commune. Exemples: « Zone urbaine », « Route&rail », « Forêt » en '60.
- Cas n°6 : Il manque les valeurs pour tout l'échantillon à une décennie «extrémité», par exemple « Verger intensif » et « Voiture » en '50: comme il n'existe pas non plus de données dans les années '40, il n'est pas possible de calculer une valeur moyenne entre '40 et '60. Mais comme il existe des données pour d'autres communes des mêmes districts en '50 et '60, nous avons appliqué les évolutions moyennes observées entre '50 et '60 sur les unités sans trou du même district.
- Cas n°7 : Dans le cas des surfaces communales, ce n'est pas leurs évolutions qui nous intéressent, mais simplement d'avoir les données correctes, afin de ne pas faire d'erreur en calculant les valeurs des variables rapportées. Dans le cas d'une variable formée de données raster provenant de la base de données GEOSTAT, les points ont été agrégés sur la surface dessinée par le polygone représentant la commune, puis la valeur résultante a été divisée par la surface définie comme étant la surface réelle de la commune à cette décennie. Nous avons estimé les surfaces de la façon suivante: Les surfaces communales de '50 et '70 sont données par les statistiques. Comme les surfaces fournies par le service GEOSTAT de l'OFS, décrivant l'état en 1996, ne sont pas aussi précises, nous les avons remplacées par les valeurs de '70. Les valeurs

en '60 et '80 ont simplement été calculées par les moyennes entre les données correspondant aux deux décennies adjacentes. Les valeurs sont donc les mêmes en '70, '80 et '90. Dans les cas de grands changements entre deux décennies, nous avons cherché, en détail, ce qui s'est passé et à quel moment (discussions avec les autorités communales concernées), afin d'estimer au mieux les valeurs de '60 et de corriger le cas échéant celles de '80 et '90.

Mentionnons encore que les données manquantes ne doivent pas être confondues avec les valeurs nulles, qui ne sont pas toujours explicitement mentionnées comme telles dans les statistiques.

4.1.3.5 Etude préliminaire des variables

Nous avons défini un premier sous-échantillon de 50 communes afin de tester la possibilité de récolter les données (disponibilité des sources, estimation des valeurs manquantes), la possibilité de les utiliser dans les analyses prévues (signification, comparabilité, confiance), le pas de temps à considérer pour couvrir la période d'étude et finalement les capacités des logiciels à disposition pour extraire, rassembler, copier, trier, transformer et archiver les données. Cette étape est primordiale avant d'entamer la récolte des données sur un échantillon de près de 1'000 unités. Ce sous-échantillon se compose de 30 communes choisies de façon systématique sur les trois zones (Jura, Plateau, Préalpes) de la zone d'étude (10 sur chacune), et de 20 communes qui recoupent des zones d'étude de la Station ornithologique suisse de Sempach. Les conclusions sont les suivantes:

- (1) Les valeurs de « Forêt », « Route&rail » et « Zone urbaine », extraites de la Statistique de la superficie de l'OFS distribuée par GEOSTAT en '80 et '90 (OFS, 1996) ne peuvent pas être comparées aux valeurs des recensements antérieurs de l'OFS (Bureau fédéral de statistique, 1953 ; Bureau fédéral de statistique, 1972) car les méthodes de saisie ne sont pas comparables. Cette différence est flagrante pour « Route&rail » de par la nature linéaire de cette variable: les éléments linéaires sont sous-estimés par l'échantillonnage en raster 100x100m de GEOSTAT. Selon Miserez (1999), l'agrégation permet tout de même de réduire les erreurs d'échantillonnage des catégories rares ou dont surface est faible. Pour les éléments surfaciques (« Forêt » et « Zone urbaine »), l'erreur introduite par ce changement de source de données entre '70 et '80 est probablement plus important que l'évolution réelle entre deux décennies consécutives, comme nous l'avons montré par la comparaison des valeurs de SAU provenant des recensements fédéraux de l'agriculture et de l'horticulture effectués par l'OFS et des valeurs de surface agricole utile provenant de la Statistique de la superficie de l'OFS distribuée par GEOSTAT (Annexe 4.5). Le mélange de ces deux sources de données pour les variables "Zone urbaine" et "Forêt" dans une série chronologique de valeurs depuis 1950 jusqu'à 1990 ne peut se faire qu'avec prudence. Il est indispensable de tenir compte de cette discontinuité entre '50-'60-'70 et '80-'90.
- (2) Des données extraites de différents types de documents (données informatisées, cahiers de statistiques, cartes) peuvent être utilisées simultanément pour arriver à une série temporelle d'une variable, à condition d'informer le lecteur du risque de divergences, mais l'homogénéité des sources de données devrait être privilégiée. Bien que les données aient été harmonisées dans une mesure qui permette, à première vue, des comparaisons entre les communes ou entre les époques, nous n'avons pas pu vérifier si les différences entre les communes ou entre les époques

résultent, en plus grande partie, d'erreurs méthodologiques ou de réelles différences et évolutions. Les résultats des analyses de cette base de données devront toujours être interprétés en tenant compte de cette possibilité d'erreur méthodologique.

- (3) Le pas de temps réel entre les données d'une série temporelle doit être aussi constant que possible. Nous avons utilisé de préférence des données correspondant au début de la décennie concernée. Dans le cas où la plupart des décennies sont caractérisées par des valeurs correspondant au milieu de la décennie (par exemple 1955, 1965 et 1975 au lieu de 1950, 1960 et 1970), nous avons dans la mesure du possible terminé la série de la même façon (1985 et 1995 au lieu de 1980 et 1990).
- (4) Deux valeurs sont, en théorie, suffisantes pour construire une série temporelle dans le cas d'une évolution linéaire, mais nous observons, ici, qu'aucune variable n'est assez simple pour être décrite de cette façon. Suite à cette réflexion, nous faisons le choix de récolter systématiquement les données à chaque décennie, donc 5 valeurs par commune et par variable.

4.2 Résultats

La base de données « Paysage » est archivée dans la table « Paysage » dans l'Annexe « Bd&Variables », sur un CD.

4.3 Discussion et conclusion

Les 40 variables qui ont été récoltées permettent de décrire l'utilisation du sol, les pratiques agricoles, les conditions climatiques, la morphologie et la géographie des 936 communes. Cette base de données contient un large éventail de variables, qui couvrent différents domaines concernés lorsqu'il s'agit de reproduire et analyser les tendances de la dynamique du paysage. Les valeurs sont très proches de la réalité, mais l'utilisateur de cette base de données doit être conscient de ses limites d'utilisation, c'est-à-dire des estimations qui ont été faites et de la signification des variables.

La période d'étude s'étend de 1950 à la fin des années '90. Les années '50 sont marquées par le début de l'intensification des pratiques agricoles, avec tout d'abord la mécanisation, puis l'utilisation des engrais et l'augmentation de la production (Broggi & Schlegel, 1990). Toute la période est caractérisée par un important développement des zones urbaines et des réseaux de transports. Notre base de donnée décrit cette période d'étude par 5 valeurs correspondant à l'état aux 5 décennies ('50, '60, '70, '80 et '90).

La zone d'étude correspond à la partie Nord-Ouest du pays, c'est-à-dire la zone principale de production agricole et, également, la zone d'habitat potentiel du lièvre brun. Notre échantillon donne une certaine image de cette zone. Le nombre d'unités (936 communes) est adéquat pour analyser cette base de données selon des méthodes statistiques. Comme il a été choisi, non seulement en

fonction des objectifs de notre recherche, mais également en fonction des données à disposition, il n'est ni statistiquement représentatif, ni réparti uniformément (voir chapitre 1 « Introduction »).

L'unité spatiale « commune » est la plus petite unité de gestion en Suisse et, de ce fait, adaptée à l'étude des effets de la gestion et à des études historiques (Reenberg & Baudry, 1999). En effet, cette « taille de grain » permet l'utilisation des données statistiques, c'est-à-dire l'inclusion de facteurs d'influence de types socio-politiques (population, voitures, taille des parcelles, subventions AF) et climatiques (pluviométrie, température). Cette unité spatiale n'est, par contre, pas idéale pour utiliser des données de la Statistique de la superficie de l'OFS distribuées par GEOSTAT, des photos aériennes et des cartes topographiques : les données de GEOSTAT doivent être agrégées, ce qui implique des hypothèses et erreurs méthodologiques (Miserez, 1999) ; l'extraction des données des photos aériennes et des cartes topographiques, par digitalisation, demande un temps très important s'il s'agit de couvrir tout l'échantillon (936 communes). Il est préférable de n'utiliser ces documents que pour combler des trous ponctuels dans des séries temporelles.

Notre base de données « Paysage » comprend une caractéristique spatiale à travers la variable « Position », qui, bien qu'elle ne positionne pas les communes de façon univoque, introduit tout de même une référence spatiale. De plus, les communes sont positionnées dans l'espace par les coordonnées de leur centroïde, ce qui permet d'archiver dans un SIG les communes et les valeurs associées aux variables (appelées attributs dans le langage propre aux SIG). Ceci permet de les représenter sur des cartes, et, finalement, de visualiser les distances entre les communes, leur arrangement spatial, ainsi que les taches créées par les communes selon la valeur de leurs attributs. Nous pourrions comparer ces taches avec des agrégations de communes déjà existantes, par exemple géo-politiques (cantons), morphologiques (relief) ou sociologiques (agglomérations). La caractéristique spatiale du modèle serait toutefois plus marquée si la base de données contenait des variables décrivant les interactions entre les communes.

Les statistiques relevées par l'Office fédéral de la statistique, par commune, sont les plus intéressantes pour atteindre notre objectif d'étudier la dynamique du paysage et ses facteurs d'influences sur une grande partie de la Suisse. En effet, elles apportent des informations à une macro-échelle sur une grande surface échantillonnée, mettant en évidence différents types d'utilisation du sol, d'agriculture et de cultures à l'intérieur de chaque commune. Pour travailler avec plus de détails, à une échelle plus fine, d'autres sources de données devraient être utilisées, comme Fjellstad & Dramstad (1999) le mentionnent: les statistiques ne relèvent ni l'arrangement spatial des différentes utilisations du sol et leurs relations, ni les éléments non-économiques, comme les petits biotopes, les lisières, les haies, etc. Reenberg & Baudry (1999) arrivent à la conclusion que les statistiques quantitatives concernant l'utilisation du sol risquent de mener à de fausses conclusions si les relations entre l'utilisation du sol et le paysage ne sont pas incluses: les tendances importantes, d'un point de vue environnemental, risquent d'être moins apparentes qu'avec des données spatiales de l'utilisation du sol. Ces conclusions nous mettent en garde sur la manière dont notre base de données peut être utilisée.

L'ajout de variables rapportées à la surface concernée agrandit considérablement notre base de données (de 28 à 40 variables). Ces variables auront souvent plus de signification que les variables

rapportées à la surface communale. Par exemple, une petite valeur de la variable « Tracteur/Surface communale » n'est pas aussi expressive qu'une petite valeur de « Tracteur/Surface agricole utile ». Dans le premier cas, nous ne savons pas si la commune est de caractère peu rural ou si les agriculteurs ont des pratiques agricoles encore très peu mécanisées, alors que, dans le deuxième cas, nous savons qu'il s'agit d'une commune peu mécanisée. Les analyses ultérieures de la base de données permettront de dire si elles ont chacune un sens et une importance pour répondre à la question de l'évolution du paysage.

Terminons ce chapitre en rappelant l'importance d'essayer certains aspects de la démarche proposée sur un sous-échantillon (ici 50 communes), avant d'entreprendre une importante récolte de données : ces essais nous ont permis de confirmer nos choix concernant les sources de données, la période d'étude, les pas de temps et les logiciels.

Les apports de ce chapitre pour notre recherche

Par ce chapitre, nous avons présenté notre démarche de construction de la base de données « Paysage », sur laquelle se baseront toutes les analyses effectuées dans la suite de notre recherche. Il était primordial de présenter de façon détaillée les difficultés et les choix rencontrés durant cette phase d'acquisition des données, afin de connaître leurs définitions exactes ainsi que leurs limites. Avant de passer à des analyses de cette base de données (chapitres 6 et 7), dont le but est d'identifier les relations entre l'évolution des populations de lièvres et la dynamique du paysage, nous allons, à travers l'étude préliminaire des variables du chapitre 5, comparer et vérifier la qualité et la signification des données. Cette étape préliminaire nous permettra également d'avoir déjà une première idée de la dynamique du paysage en Suisse, lorsqu'on la décrit à l'aide de nos variables « Paysage ».

Chapitre 5

Etude préliminaire du paysage et de sa dynamique

Le but de cette étude préliminaire est de décrire succinctement l'ensemble des variables et de formuler une première série d'hypothèses relatives à la dynamique du paysage en Suisse. Cette discussion globale est nécessaire pour aborder la recherche des variables clés du paysage dans le chapitre 6 « Le lièvre et le paysage », avant d'approfondir le sujet sur la base de l'analyse détaillée de ces variables clés, dans le chapitre 7 « La dynamique du paysage en fonction des variables clés ».

En plus, nous tenterons de réduire le nombre de variables par une analyse en composante principale (ACP). Mais, tout d'abord, nous utiliserons les différentes méthodes de représentation des données (graphiques, cartes) pour identifier la méthode adéquate pour estimer les valeurs manquantes et corriger d'éventuelles erreurs et valeurs illogiques détectées sur ces mêmes graphiques.

5.1 Méthode

5.1.1 Méthodes statistiques descriptives

Nous avons mené une analyse de données exploratoire avec S-PLUS 2000 Professional Release1 (Venables & Ripley, 1998) et Statistica. Un rappel théorique des méthodes utilisées se trouve dans l'Annexe « Bd & Variables » (sur un CD). Pour plus de théorie, nous renvoyons le lecteur aux nombreux ouvrages traitant de statistiques, par exemple celui de Wonnacott & Wonnacott (1972).

Notre analyse comprend la recherche des distributions (histogrammes), des valeurs caractéristiques (boxplots), de l'évolution des valeurs moyennes et médianes, de l'évolution des valeurs de 30 communes-exemples, et finalement de la répartition spatiale. Elle a été effectuée pour chaque variable à partir de l'échantillon total de 936 communes:

- Sur les valeurs à chaque décennie, de 1950 à 1990 (nommées '50, '60, '70, '80 et '90)
- Sur les différences entre les valeurs des décennies '50 et '60, '60 et '70, '70 et '80, '80 et '90 (nommées $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$).

Le but de cette analyse est de répondre aux questions suivantes:

Histogrammes et boxplots

Les données contiennent-elles des valeurs extrêmes¹ ? Celles-ci doivent être examinées plus en détail afin de déterminer s'il s'agit de valeurs réelles ou de fautes de frappe, d'erreurs lors d'estimations, d'erreurs méthodologiques, et le cas échéant corrigées.

- Certaines variables présentent-elles des valeurs illogiques ? Ces valeurs devront être corrigées.
- Quelle est la distribution de fréquence des variables ? S'agit-il d'une distribution croissante, décroissante ou symétrique ? Cette information montre quel est l'état ou le comportement de la majorité des communes, ainsi que l'existence éventuelle de communes avec un état ou un comportement différent.
- Comment discrétiser les variables quantitatives ? Cette transformation des données est nécessaire avant d'utiliser le modèle Pegase.
- Quelle est la part des valeurs nulles ? Une valeur nulle à une décennie révèle une absence d'un critère, donc probablement une absence de gestion spécifique à ce critère. Une valeur nulle de différence entre deux décennies révèle une stabilité dans le temps.

¹ Valeurs extrêmes : traduction du terme anglais « outliers ».

- Quelle est l'étendue des valeurs ? Une large étendue des valeurs à une décennie montre une importante disparité entre les communes (disparité spatiale), alors qu'une large étendue sur une partie ou sur l'ensemble de la période d'étude montre une dynamique temporelle.

Graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane

- Quelle est la tendance d'évolution moyenne de chaque variable ? L'évolution de la moyenne entre les décennies peut être nulle, irrégulière ou régulière, négative (signe de diminution) ou positive (signe d'accroissement). Remarquons qu'une évolution nulle n'est pas inintéressante pour l'étude de la dynamique du paysage : une telle variable peut avoir un effet important et constant tout au long de la période d'étude. Ainsi, des variables morphologiques, géographiques et climatiques invariants dans le temps mais variables dans l'espace sont incluses dans notre base de données.
- Quelle est la tendance d'évolution moyenne de la différence entre les décennies de chaque variable ? L'évolution entre les différences entre décennies peut être nulle, constante, irrégulière, négative (signe de ralentissement de l'évolution) ou positive (signe d'accélération de l'évolution).
- Quelle est la dynamique de la médiane, par rapport à celle de la moyenne ? Ces deux valeurs caractéristiques peuvent évoluer de façon parallèle ou divergente, dans le même sens ou dans un sens inverse. Cette observation indique souvent la démarcation d'un petit nombre de communes, dont l'évolution est plus rapide que celle de la majorité.

Graphique d'évolution des valeurs de 30 communes-exemple

- Quelles formes peuvent prendre les courbes d'évolution des communes ? L'observation de l'évolution de 30 communes, sélectionnées au hasard, par génération de 30 nombres aléatoires, permet d'apprécier de façon qualitative la représentativité des courbes dessinées par les moyennes. L'observation de ces courbes aide à choisir la meilleure méthode d'estimation des valeurs manquantes.
- Quelle est la différence entre une variable rapportée à la surface communale (SC) et la même variable rapportée à la surface concernée (SAU, TO ou (SAU-TO)) ?

Bien que ces outils aient été utilisés de façon standard, quelques points doivent être précisés :

Histogramme

L'étendue des valeurs a été divisée en 10 intervalles égaux pour les histogrammes décrivant les époques '50 à '90, ce qui permet, en général, une vision optimale de la distribution. Lorsque la variable contient des valeurs très extrêmes, nous avons construit un deuxième histogramme, plus détaillé, de l'intervalle contenant la plupart des unités. Le nombre de barres est alors choisi de façon à permettre la meilleure représentation de la distribution de l'échantillon partiel.

Le nombre de valeurs nulles est indiqué dans un tableau supplémentaire. En effet, les valeurs nulles ne peuvent être différenciées des petites valeurs, étant toutes comprises dans la barre de l'histogramme ayant 0 comme borne inférieure.

Boxplot

Les valeurs extrêmes sont les unités à l'extérieur de l'intervalle [Min(0.7% ; 1.5*EIQ); Min(99.3% ;1.5*EIQ)], avec EIQ l'Etendue Inter-Quartile.

L'écart-type s de l'échantillon (Std.Dev. : Standart deviation) est défini par :

$$s = \sqrt{\text{Variance}} = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1}},$$

avec X les valeurs observées, \bar{X} la moyenne des valeurs observées et $N = 936$ le nombre total d'unités de l'échantillon.

L'erreur standard de la moyenne $s_{\bar{X}}$ de l'échantillon (valeur non corrigée) (SE mean : Standart error of

the mean) est définie à partir de l'écart-type de l'échantillon par $s_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$.

Graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane

Sur ces graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane, nous avons fait figurer les droites ajustées par régression linéaire (calculées de façon standard par la fonction « Ajout d'une courbe de tendance » d'Excel).

Caractéristiques principales

Une partie des informations contenues dans ces histogrammes, boxplots et graphiques d'évolution sont résumées par deux séries de descripteurs, l'une relative aux valeurs aux cinq décennies ('50, '60, '70, '80 et '90), l'autre relative aux différences entre les décennies ($\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$).

Sont relevés tout d'abord l'**unité (A)** et l'**étendue des valeurs (B)**, donnée par les minima et les maxima sur la période 1950-1990, les valeurs **moyennes (C)** et les **écart-types (D)**, avec leurs valeurs **moyennes (E)** et **(F)**.

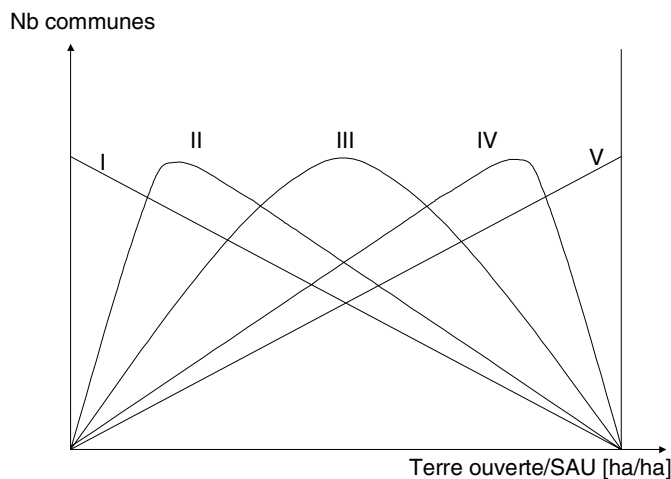
Les **distributions (G)** de fréquence des variables sont grossièrement classées selon 5 types empiriques (Types I à V, Fig.5.1), sur la base de l'observation visuelle des histogrammes. Cette classification distingue les distributions :

- décroissantes (I) : le mode (valeur la plus fréquente) est l'intervalle comprenant les valeurs les plus petites,
- étalées vers la droite (II) : le mode est compris dans le premier tiers de l'intervalle total,

- symétriques (III) : la distribution est étalée vers la gauche et la droite, le mode est compris dans le deuxième tiers de l'intervalle total, sans que l'unimodalité (moyenne, médiane et mode confondus) soit vérifiée,
- étalées vers la gauche (IV) : le mode est compris dans le dernier tiers de l'intervalle total,
- croissantes (V) : le mode est l'intervalle comprenant les valeurs les plus grandes.

Ce niveau de détail est suffisant pour notre étude, les analyses statistiques que nous effectuerons ne nécessitant pas une distribution spécifique des variables. Par exemple, pour une analyse de régression, les variables ne doivent pas être distribuées selon une loi normale, par contre les erreurs doivent l'être.

Fig. 5.1 : 5 types de distribution de fréquence des variables : décroissante (I), étalée vers la droite (II), symétrique (III), étalée vers la gauche (IV), et croissante (V). « distribution symétrique » correspond à une distribution étalée vers la gauche et la droite, dont le mode est compris dans le deuxième tiers de l'intervalle total, sans que l'unimodalité (moyenne, médiane et mode confondus) soit vérifiée.



Il nous semble important de souligner la présence des **valeurs nulles (H)**. En effet, une commune qui ne possède pas un certain élément, par exemple pas de vergers intensifs, de forêts ou de routes nationales, n'en tiendra pas compte dans sa gestion du territoire ou des ressources. Des valeurs nulles pour $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$ indiquent un statu quo, une absence d'évolution, qu'il faut également relever.

Les **valeurs extrêmes (I)** visibles sur les boxplots correspondent à des communes qui se démarquent de la majorité de l'échantillon.

L'**évolution de la moyenne (J)** est décrite par le signe et la pente de la droite ajustée par régression linéaire, ainsi que la qualité R^2 de l'ajustement. La pente de la droite ajustée sur les valeurs aux décennies '50, '60, '70, '80 et '90 donne la modification moyenne de la variable par 10 ans. La pente de la droite ajustée sur les différences des valeurs aux décennies ($\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$) donne l'évolution moyenne de la modification de la variable en 10 ans. Le **type d'évolution de la**

moyenne (K) est un code « imagé » descriptif de la forme de la courbe dessinée par les moyennes des valeurs aux cinq décennies '50, '60, '70, '80 et '90 (ou aux quatre différences de valeurs $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$). Il indique si la courbe réelle dessinée par les 5 (resp.4) moyennes se trouve au-dessus ou au-dessous de la droite ajustée : par exemple, le code « U » indique que les valeurs intermédiaires se trouvent au-dessous de la droite ajustée, alors que le code « n » indique l'inverse. Cette forme est, en général, également représentative des courbes d'évolution des 30 communes-exemple.

La position relative de la médiane \tilde{x} par rapport à la moyenne \bar{x} renseigne sur la forme de la distribution : $\tilde{x} > \bar{x}$ indique une distribution étalée à gauche (type IV) ; $\tilde{x} < \bar{x}$ indique une distribution étalée à droite. Il est intéressant d'observer les **positions relatives des droites ajustées sur les médianes et sur les moyennes (L)** : Elles peuvent être ascendantes ou descendantes toutes les deux, mais jamais l'une ascendante et l'autre descendante. Elles peuvent se croiser sur l'intervalle '50 à '90 (ou $\Delta 50-60$ à $\Delta 80-90$), ne pas se croiser sur cet intervalle, ou, plus particulièrement, être parallèles. La médiane peut être supérieure à la moyenne ou le contraire en '50 (resp. $\Delta 50-60$) et l'inverse en '90 (resp. $\Delta 80-90$). Ce comportement peut être révélateur de phénomènes intéressants. Par exemple, une médiane inférieure à la moyenne et qui augmente beaucoup moins rapidement que la moyenne indique que la distribution devient de plus en plus étalée à droite avec le temps, donc qu'un petit nombre de communes deviennent de plus en plus différentes de la majorité.

5.1.2 Carte de distribution spatiale

Les SIG permettent de visualiser sur des cartes la position des unités spatiales et leurs attributs (les variables). Nous avons utilisé la fonction « Carte thématique » du logiciel MapInfo pour produire ces cartes illustratives des variables. Les variables continues sont représentées par 5 classes en tons de gris, plus une classe blanche avec les valeurs nulles, le cas échéant. Les classes des cartes d'état à une décennie sont le plus souvent équidistantes, sauf lorsque la lisibilité n'est pas suffisante, auquel cas nous avons eu recours à des classes équipotentielles ou irrégulières. Seules les cartes montrant des différences spatiales ou des évolutions marquantes ont été produites. Le but de cette représentation est d'aider à répondre aux questions suivantes :

- Dans quelles régions se trouvent les valeurs élevées, peu élevées ou nulles ?
- Dans quelles régions se trouvent les évolutions fortement ou faiblement positives, négatives ou nulles ?

Des regroupements de communes, visibles sur ces cartes, indiqueraient des états ou évolutions semblables, dont la cause est probablement un facteur ou un ensemble de facteurs régionaux. A défaut de regroupements continus de communes semblables, des tendances de différences peuvent apparaître, dont la cause est à chercher dans un facteur d'influence à plus large échelle. A l'inverse, des comportements inattendus peuvent apparaître au travers de communes isolées, révélant des spécificités très locales, fonctionnant à petite échelle.

5.1.3 Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP est une méthode multivariée qui permet de réduire le nombre de variables originales à un certain nombre de combinaisons linéaires de celles-ci, appelées les composantes principales. Elle a été effectuée avec le logiciel S-PLUS 2000 Professional Release1 (Venables & Ripley, 1998). L'importance de chaque composante se mesure par la variance des points projetés sur l'axe qu'elle définit. En général, les deux ou trois premières composantes (C1, C2 et éventuellement C3) expliquent, à elles seules, la plus grande partie de la variabilité ou dispersion totale du nuage de points dans l'espace multidimensionnel dont les axes, tous orthogonaux, sont les composantes principales. L'ACP donne comme résultat une matrice des coefficients de transformation permettant de calculer les nouvelles coordonnées des unités dans cet espace multidimensionnel. Les poids des variables, dans chaque composante, sont les coefficients de la combinaison linéaire et également les coordonnées des variables projetées dans cet espace multidimensionnel. Ces poids servent de base à l'interprétation d'une ACP : on cherche à opposer les variables avec un poids élevé aux variables avec un poids faible ou alors, suivant les cas, les variables avec un poids positif aux variables avec un poids négatif. La composante peut ensuite être décrite comme représentative d'une nouvelle caractéristique, opposant les variables et les unités dont cette caractéristique est bien marquée, à celles dont elle est peu marquée.

Les ACP ont été effectuées sur la base de la matrice des corrélations afin de ré-échelonner les valeurs. En effet, cette étape est nécessaire avec notre base de données vu qu'elle contient des variables avec différentes unités ([ha/ha] ou [m²/ha], [m], [nb/ha], [mm/an], [Kg/nb vache/an], [CHF/an/ha]). Dans ce cas, les composantes dont la valeur propre (égale au carré de la déviation standard mesurée par S-Plus) est inférieure à 1, peuvent être exclues de l'interprétation du résultat.

Cette analyse par ACP a été effectuée sur la base de données « Paysage », dont la variable « Agglomération appartenance » a été retirée. En effet, cette variable catégorielle, non-ordonnée, est la seule variable non-continue, et ne peut donc pas être utilisée sous sa forme binaire (codes 0 et 1 qui n'expriment pas d'ordre de préférence) à côté de variables ordonnées (M.Helbling, EPFL, communication orale). Nous avons calculé :

- Une ACP sur les valeurs à chacune des quatre époques : '50, '60, '80 et '90,
- Une ACP sur les valeurs de '50 et '60 (2x936=1'872 unités), ainsi qu'une ACP sur les valeurs de '80 et '90 (2x936=1'872 unités), afin de pouvoir suivre l'évolution des communes entre '50 et '60, puis entre '80 et '90 le long de l'axe dessiné par la première composante principale.

Rappelons que la comparaison entre les valeurs en '50 et en '60 des variables « Forêt », « Route&rail » et « Zone urbaine » avec les valeurs en '80 et en '90 n'est possible qu'avec réserve à cause du changement méthodologique de relevé de surfaces (voir chapitre « Base de données Paysage », 4.1.3.5) : avant '80, par planimétrie par l'OFS (Bureau fédéral de statistique, 1953 ; Bureau fédéral de statistique, 1972) ; dès '80, par agrégation des valeurs relevées sur une grille hectométrique d'un SIG fourni par GEOSTAT de l'OFS (OFS, 1996). C'est la raison pour laquelle nous menons deux ACP distinctes sur deux décennies et non pas une ACP globale mélangeant ces quatre séries de données difficilement comparables.

Le but est de :

- Identifier des groupes de communes qui se ressemblent, c'est-à-dire des regroupements de communes lorsqu'elles sont projetées dans les plans définis par les composantes principales prises deux à deux, par exemple (C1 ;C2) ou (C2 ;C3) (A).
- Evaluer dans quelle mesure il est possible de réduire le nombre de variables de notre base de données (40 variables au départ), c'est-à-dire découvrir de nouvelles variables qui permettraient de décrire l'état du paysage et sa dynamique de façon plus simple, en résumant un certain nombre de variables de notre base de données (A).
- Caractériser la dynamique des communes entre '50 et '60, puis entre '80 et '90 le long de l'axe dessiné par la première composante principale C1 (B).
- Aider à la compréhension des relations entre les différentes variables ((A) et (B)).

5.2 Résultats et discussions

5.2.1 Caractéristiques principales et distribution géographique des variables

5.2.1.1 Résultats

Chaque variable est décrite, dans l'Annexe « Bd & Variables » (sur un CD), par des histogrammes, boxplots, graphiques d'évolution et cartes de distribution spatiale. La description totale de la variable « Maïs/SAU » se trouve comme exemple dans l'Annexe 5.1. Une partie des informations données par ces graphiques est résumée dans Tab.5.1 et Tab.5.2, dans lesquels les variables sont regroupées par type, comme ils ont été définis dans Tab.4.3, Chapitre 4 « La base de données Paysage ».

5.2.1.2 Discussion

Base de données « Paysage »

La base de données « Paysage » réunit des variables de différents types (Utilisation du sol, Pratiques agricoles, Urbanisation, Climat, Morphologie, Géographie) pour décrire les 936 communes de l'échantillon, à chaque décennie entre 1950 et 1990, offrant une source d'informations homogènes qui vient compléter celles apportées par les études existantes, concernant l'évolution du paysage en Suisse : Ewald (1978) et Broggi & Schlegel (1990) ne se sont pas basés sur un recueil systématique de données, mais se sont penchés sur une analyse à un niveau de détail plus fin ; la méthode de relevé mise au point par Sigmaplan/Metron/Metrotest (1994) n'a pas été appliquée aux années précédant 1972 ; la base de données GEOSTAT de l'OFS inclut un grand nombre d'éléments, sous formes de points, trame de points, trame, lignes ou polygones, mais n'a pas été étendue aux années

précédant 1980 (OFS, 2001). Cette dernière constituera certainement la base de données de référence pour des études sur le paysage à partir de 1980, vu que l'Office fédéral de la statistique a intégré dans son programme statistique l'observation régulière de l'évolution de l'utilisation du territoire, selon cette méthode.

La dynamique du paysage

Utilisation du sol : La « Surface agricole utile » est en légère diminution, de 1% par 10 ans, en moyenne sur l'ensemble de notre échantillon, avec une tendance de ralentissement faiblement marquée. La « Forêt² » est en diminution entre 50 et 70 ainsi qu'entre 80 et 90. Les autres utilisations du sol sont en augmentation : Les « Terres ouvertes »³ s'accroissent de plus en plus rapidement, alors que la croissance du réseau de « Routes nationales » se ralentit. Les « Zones urbaines² » ainsi que le réseau de « Route&rail² » s'accroissent entre 50 et 70 ainsi qu'entre 80 et 90. Ces tendances sont également mentionnées par l'OFS (2001) entre 1979/85 et 1992/97, sur une période d'environ 10 ans : La SAU diminue de 3% sur le Plateau suisse et de 1,9% dans le Jura alors que les surfaces d'habitat et d'infrastructure (entre autres les surfaces de transports) augmentent de 11,9%, resp. 14,5%. Par contre, la forêt reconquiert le terrain perdu non seulement sur les pâturages de montagne abandonnés, mais également en plaine (+0,3% resp. +0,2%).

La distribution des valeurs des variables « Zone urbaine », « Route&rail » et « Terre ouverte » est décroissante, avec des valeurs extrêmes positives, indiquant qu'un petit nombre de communes ont de grandes surfaces d'infrastructures (zones urbaines et voie de communications), et, entre '60 et '90, un petit nombre de communes ont de grandes étendues agricoles. Cette situation n'était pas aussi claire en '50, avec une distribution de « Terre ouverte » étalée vers la droite, donc dont la valeur la plus fréquente n'est pas la valeur minimale. Cette asymétrie décroissante, de plus en plus marquée à partir de '50, reflète une intensification des pratiques agricoles, dont l'exploitation en terres ouvertes est une des conséquences. Elle est confirmée par une légère divergence d'évolution entre la moyenne et la médiane. La distribution des surfaces de « Forêt » est étalée vers la droite, avec un mode qui n'est pas celui de l'intervalle avec les valeurs les plus petites, montrant qu'un certain nombre de communes ont des surfaces relativement importantes de forêts et que seules quelques communes ont une surface très réduite de forêts. Les surfaces de « SAU » sont distribuées de façon symétrique à chaque décennie. Le nombre très important de communes qui n'ont pas de « Routes nationales » sur leur territoire (99.7% en '90 et 80% en '50), se traduit par une distribution selon une forme presque bimodale, opposant les valeurs nulles aux valeurs non-nulles.

² Rappelons que la comparaison entre '70 et '80 des valeurs des variables « Forêt », « Route&rail » et « Zone urbaine » n'est possible qu'avec réserve à cause du changement méthodologique de relevé de surfaces (par planimétrie par l'OFS de '50 à '70 et par la méthode GEOSTAT en '80 et '90, voir chapitre 4 « Base de données Paysage », 4.1.3.5).

³ Lorsque la surface de référence (SC, SAU, TO ou (SAU-TO)) n'est pas précisée pour une variable, il s'agit de la variable en général.

Clé de lecture pour Tab.5.1 ('50, '60, '70, '80 et '90) :

* : rien de remarquable

() : caractéristique peu marquée

(A) Unité

(B) Etendue des valeurs sur la période 1950-1990 (Exemple de lecture : 0-0.996: valeur minimum=0 et valeur maximum=0.996)

(C) Valeurs moyennes en '50, '60, '70, '80 et '90.

(D) Ecart-types en '50, '60, '70, '80 et '90.

(E) Moyenne sur les 5 décennies des valeurs moyennes (moyenne des valeurs (B)).

(F) Moyenne sur les 5 décennies des écart-types (moyenne des valeurs (C)).

(G) Type de distribution (voir Fig.3), code décrivant la forme de l'histogramme. Bcp zéros ! : forme dominée par la barre contenant les valeurs nulles. (Exemple de lecture : III:50-60 :Type III en '50 et '60 ; IIc:70-90: Type IIc en '70, '80 et '90). Ce descripteur est le résultat de l'observation visuelle des histogrammes de l'Annexe « Bd & Variables », sans test de sa signification.

(H) Nb de valeurs nulles à chaque décennie (Exemple de lecture : 0/2/5/9/24: '50 : 0 valeur nulle ; '60 : 2 valeurs nulles ; '70 : 5 valeurs nulles ; etc)

(I) Valeurs extrêmes : + : présence de valeurs extrêmes fortement positives; - : présence de valeurs extrêmes dans les petites valeurs ou fortement négatives (Exemples de lecture :+56 : valeurs extrêmes positives en '50 et '60).

(J) Droite ajustée sur les moyennes. Les valeurs entre parenthèse doivent être considérées avec prudence pour les variables « Forêt », « Route&rail » et « Zone urbaine » qui présentent d'importantes différences entre '70 et '80 pour des raisons méthodologiques (voir Chapitre Base de données Paysage, 4.1.3.5).

- Tendance : + : droite ascendante; - : droite descendante ; (+) ou (-) : tendance peu marquée ($R^2 < 0.6$). (Exemple de lecture : (+): 57,89 : tendance positive observée entre '50 et '70 et entre '80 et '90 la tendance entre '70 et '80 doit être considérée avec prudence.

- Pente : modification moyenne de la variable par 10 ans.

- R^2 : qualité de l'ajustement.

(K) Type d'évolution de la moyenne, décrivant la forme de la ligne brisée dessinée par les moyennes par rapport à la droite ajustée sur les moyennes : n : augmentation puis diminution ; U : diminution puis augmentation ; N : augm-dim-augm ; S : dim-augm-dim ; W : dim-augm-dim-augm ; M : augm-dim-augm-dim (Exemple de lecture : W : sur les intervalles '50-'60 et '70-'80, la moyenne évolue négativement par rapport à la droite ajustée ; sur les périodes '60-70 et '80-90, elle évolue positivement). Ce descripteur est le résultat de l'observation visuelle du graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane de l'Annexe « Bd & Variables », sans test de sa signification.

(L) Tendance de la droite ajustée sur les médianes par rapport à la droite ajustée sur les moyennes (nul : médiane nulle entre '50 et '90) :

- premier terme : position relative (0 : médiane et moyenne sur la même ordonnée ; + : médiane au-dessus de moyenne ; - : médiane au-dessous de moyenne)

- deuxième terme : pente de la médiane par rapport à celle de la moyenne (0 : droites parallèles ; + : pente médiane plus forte que pente moyenne ; - : pente médiane plus faible que pente moyenne ; - ! : pente médiane beaucoup plus faible que pente moyenne)

Exemple de lecture : 0- : en '50, la médiane et la moyenne ont la même ordonnée mais la médiane a une pente plus faible que la moyenne. Ce descripteur est le résultat de l'observation visuelle du graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane de l'Annexe « Bd & Variables », sans test de sa signification.

Pratiques agricoles : Les surfaces cultivées en « Maïs » et en « Vergers intensifs » s'accroissent à un rythme relativement constant, et le nombre de communes sans ces types de culture diminue fortement, passant entre '50 et '90 de 49% à 8% pour le maïs (voir Annexe 5.1) et de 75% à 46% pour les vergers intensifs. On constate, comme avec les terres ouvertes, une divergence d'évolution entre la moyenne et la médiane des surfaces exploitées en vergers intensifs, montrant l'apparition de communes qui se distinguent de la majorité par d'importantes surfaces de vergers intensifs. La distribution de ces deux variables est de plus en plus asymétrique (décroissante). La production de « Lait » par vache augmente sans cesse (la moyenne passe entre '50 et '90 de 3757 à 5468 Kg/an), reflétant non seulement les améliorations génétiques des vaches, mais également les progrès dans les techniques d'alimentation du bétail. Ceci compense le fait que le nombre de « Vaches laitières » diminue de plus en plus (la moyenne des différences entre deux décennies passe de +3.2 entre '50 et '60 à -5.1 entre '80 et '90). Ce phénomène s'accompagne d'une diminution des pâturages et prairies à fauche et constitue un signe d'intensification des pratiques agricoles, de même que l'évolution de la « Taille moyenne des parcelles » et du nombre de « Tracteurs », évolution qui ralentit avec le temps. L'accroissement du nombre de tracteurs implique une diminution du nombre de « Main-d'œuvre », les travaux aux champs étant facilités par l'introduction des moyens mécaniques. Nous verrons, par la suite, que la main-d'œuvre reste nécessaire à l'exploitation de certains types de cultures à forte valeur ajoutée, telles la viticulture et l'horticulture.

Les distributions de « Tracteur » et de « Vache laitière » sont symétriques, avec une tendance vers un étalement vers la droite. Celles de « Main-d'œuvre » et de « Taille des parcelles » sont étalées vers la droite, alors que celles des deux variables cantonales (« Lait » et « SubventionsAF ») ne sont pas caractéristiques.

Pour terminer, la distribution de la variable « Sol défavorable » est décroissante. 73% des communes n'ont qu'une faible part de terres avec des sols peu favorables aux cultures céréalières (terres non saturées en eau et dont la perméabilité n'est pas ralentie).

Urbanisation : L'urbanisation ne se remarque pas seulement par une utilisation du sol de type bâtie, mais également par des entités géopolitiques, telles les villes ou les agglomérations. Rappelons que ces dernières se définissent, de façon simplifiée, comme des réunions de communes totalisant au moins 20'000 habitants, présentant un lien morphologique ou fonctionnel avec la zone centrale et une marque économique ou sociale de l'urbain Schuler et al. (1997) (voir également chapitre 2 « Etat des connaissances », paragraphe 2.3.2).

Les agglomérations existantes, s'étendent, de nouvelles se créent (augmentation de « Agglomération taille »), incluant de plus en plus de communes (augmentation de « Agglomération appartenance ») et réduisant la distance entre les communes non incluses dans une agglomération et l'agglomération la plus proche (diminution de « Agglomération distance »). Le nombre de « Bâtiments » est en forte augmentation, correspondant au développement, non seulement des zones urbaines, mais également des zones à bâtir hors des zones urbaines (augmentation moyenne de la densité de 0,9 bâtiments/km² par année). En effet, selon l'OFS (2001), un tiers des immeubles résidentiels se construisent actuellement en zones rurales. En même temps, la population s'accroît (de 9% entre 1979/85 et 1992/97) et, surtout, la surface moyenne utilisée, par habitant, pour le logement augmente.

Clé de lecture pour Tab.5.2 ($\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$) :

* : rien de remarquable

() : caractéristique peu marquée

(A) Unité

(B) Etendue des valeurs sur $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$ (Exemple de lecture : -0.792 ; 0.647: valeur minimum=-0.792 et valeur maximum=0.647).

(C) Valeurs moyennes sur $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$.

(D) Ecart-types sur $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$.

(E) Moyenne sur les valeurs moyennes (moyenne des valeurs (B)).

(F) Moyenne sur les écarts-types (moyenne des valeurs (C)).

(G) Type de distribution (voir Fig.3), code décrivant la forme de l'histogramme. Bcp zéros ! : forme dominée par la barre contenant les valeurs nulles. (Exemple de lecture : IIIbd ; IIIb : $\Delta 80-90$: Type IIIbd en $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$ et 78 ; IIIb: $\Delta 80-90$: Type IIIb en $\Delta 80-90$). Ce descripteur est le résultat de l'observation visuelle des histogrammes de l'Annexe « Bd & Variables », sans test de sa signification.

(H) Nb de valeurs nulles à chaque décennie (Exemple de lecture : 1/0/2/7: $\Delta 50-60$: 1 valeur nulle ; $\Delta 60-70$: 0 valeur nulle ; $\Delta 70-80$: 2 valeurs nulles ; etc)

(I) Valeurs extrêmes : + : présence de valeurs extrêmes fortement positives; - : présence de valeurs extrêmes dans les petites valeurs ou fortement négatives (Exemples de lecture : +,-: valeurs extrêmes positives et faible ou négatives sur $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$).

(J) Droite ajustée sur les moyennes. Cette information précise celle apportée par le type d'évolution des moyennes par décennies (colonne K, Tab.1). ainsi que par la position relative de la médiane par rapport à la moyenne (colonne L, Tab.1). Les valeurs entre parenthèse doivent être considérées avec prudence pour les variables « Forêt », « Route&rail » et « Zone urbaine » qui présentent d'importantes différences entre '70 et '80 pour des raisons méthodologiques (voir Chapitre Base de données Paysage, 4.1.3.5).

- Tendance : + : droite ascendante; - : droite descendante ; (+) ou (-): tendance peu marquée ($R^2 < 0.6$). (Exemple de lecture : - : $d50-70$ (+ : $d50-90$) : tendance négative observée entre $\Delta 50-60$ et $\Delta 60-70$ et tendance positive entre $\Delta 50-60$ et $\Delta 80-90$, mais la valeur $\Delta 70-80$ doit être considérée avec prudence.

- Pente : évolution moyenne de la modification de la variable en 10 ans.

- R^2 : qualité de l'ajustement.

(K) Type d'évolution de la moyenne, décrivant la forme de la ligne brisée dessinée par les moyennes par rapport à la droite ajustée sur les moyennes : n : augmentation puis diminution ; U : diminution puis augmentation ; N : augm-dim-augm ; S : dim-augm-dim ; (Exemple de lecture : N : sur les intervalles $\Delta 50-60$ à $\Delta 60-70$ et $\Delta 70-80$ à $\Delta 80-90$, la moyenne évolue positivement par rapport à la droite ajustée ; sur l'intervalle $\Delta 60-70$ à $\Delta 70-80$, elle évolue négativement). Ce descripteur est le résultat de l'observation visuelle du graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane de l'Annexe « Bd & Variables », sans test de sa signification.

(L) Tendance de la droite ajustée sur les médianes par rapport à la droite ajustée sur les moyennes (nul : médiane nulle entre $\Delta 50-60$ et $\Delta 80-90$) :

- premier terme : position relative (0 : médiane et moyenne sur la même ordonnée ; + : médiane au-dessus de moyenne ; - : médiane au-dessous de moyenne)

- deuxième terme : pente de la médiane par rapport à celle de la moyenne (0 : droites parallèles ; + : pente médiane plus forte que pente moyenne ; - : pente médiane plus faible que pente moyenne ; - ! : pente médiane beaucoup plus faible que pente moyenne)

Exemple de lecture : -0 : sur $\Delta 50-60$, la médiane à une ordonnée inférieure à celle de la moyenne sur $\Delta 50-60$, mais leurs pentes sont égales. Ce descripteur est le résultat de l'observation visuelle du graphique d'évolution de la moyenne et de la médiane de l'Annexe « Bd & Variables », sans test de sa signification.

D'après notre base de données, la « Population » et les « Voitures » augmentent annuellement en moyenne de 3,7 habitants/km², resp. 4,7 voitures/km². Exprimées par unité de SAU, ces augmentations sont de 75,5 habitants/km² de SAU, resp. 45,5 voitures/km² de SAU. L'augmentation de la « Population » se ralentit avec le temps, alors que celle des « Voitures » s'accélère fortement. Lorsque ces valeurs sont rapportées à la SAU, on constate l'apparition de communes qui se distinguent de la majorité par des densités de population et de voitures très importantes, phénomène révélé par la divergence d'évolution entre les moyennes et les médianes.

La proportion très importante de communes qui n'appartiennent pas à une agglomération (91% en '50 et 72% en '90), se traduit par une distribution de la variable « Agglomération taille » selon une forme presque bi modale, opposant les valeurs nulles aux valeurs non-nulles. La distribution des autres variables de type « Urbanisation » est absolument décroissante à chaque décennie, sans que la cause en soit un grand nombre de valeurs nulles.

Le fait d'appartenir à une agglomération ou non se révélera être, dans la suite de nos analyses, un critère déterminant pour le développement d'une commune. En effet, comme mentionné dans le bulletin de l'Aménagement du Territoire (AT, 2000), les agglomérations suisses sont des systèmes centre-périphérie dans lesquelles les communes sont, à la fois, très différenciées et très interdépendantes. Pourtant, la dynamique de cette variable « Agglomération Appartenance » est relativement simple : Les communes qui n'appartiennent pas encore à une agglomération en 1950 intègrent une agglomération pendant une des décennies suivantes et y restent jusqu'à la fin de la période d'étude ou alors ne sont jamais englobées par une agglomération. L'évolution se fait par paliers : chaque commune n'effectue pas plus d'un changement sur toute la période d'étude. Sept communes font exception à cette règle en intégrant une agglomération entre 1960 et 1970 et en ressortant durant la décennie suivante (Aarwangen (BE), Lotzwil (BE), Thunstetten (BE), Diepfingen (BL), Gelterkinden (BL), Ormalingen (BL) et Villmergen (AG)). La part de communes appartenant à une agglomération passe de moins de 9% en 1950 à 28% en 1990. Cette proportion est très semblable à celle de l'ensemble de la Suisse en 1990 (26%), avec 68.4% de la population (OFS, 1999). Le nombre de communes intégrant une agglomération, à chaque décennie, est relativement constant si on regarde l'évolution de la moyenne, sauf un léger ralentissement entre 1970 et 1980, puis une discrète accélération entre 1980 et 1990. Les cartes de distribution permettent de découvrir les nouvelles agglomérations qui se développent à côté des grandes agglomérations, aussi appelées aires métropolitaines⁴ (Zurich, Bâle, Berne, Genève-lausanne et le Tessin) (AT, 2000). Ainsi, on observe l'apparition de deux nouvelles agglomérations en 1960 à Wil (SG) et Langenthal (BE), et encore d'une en 1970 à Delémont (JU). Dans les trois cas, l'agglomération se compose d'une seule commune et ne s'est pas étendue pendant la période d'étude. Langenthal (BE) s'est vu adjoindre trois communes le temps d'une décennie (1970), avant de les perdre à nouveau. Le système urbain de la Suisse ne comporte que peu de grandes agglomérations (AT, 2000). Zürich est la plus importante, avec 940'000 habitants. Le reste est formé de moyennes et petites agglomérations. Indépendamment de leur taille, leur structure est marquée par les phénomènes de suburbanisation et de

⁴ Une aire métropolitaine est définie par Schuler et al. (1997) comme un système d'agglomérations ayant d'étroites relations fonctionnelles et présentant souvent aussi un lien de continuité territoriale.

périurbanisation qui apparaissent dès 1950, resp. 1970: séparation spatiale des fonctions de travail et d'habitat (différenciation fonctionnelle) et polarisation de l'espace, en fonction de l'appartenance sociale des individus (différenciation sociale).

En 1990, 33% des exploitations agricoles de plaine se trouvent dans des communes d'agglomérations. Ces exploitations, situées dans les agglomérations, bénéficient de certains avantages, tels que de meilleures possibilités d'activités accessoires et la proximité du marché (OFS, 1999). Par contre, l'exploitation est souvent rendue plus difficile suite à la pression de l'urbanisme (construction de bâtiments et de routes). Leur avenir est donc tout aussi incertain que celui des exploitations situées hors des agglomérations.

Climat : Le climat semble être devenu plus humide entre '50 et '90, phénomène constaté avec l'augmentation significative de la « Pluie » (la moyenne de la pluviométrie annuelle moyennée sur 10 ans passe, entre '50 et '9, de 994 à 1190 mm/an), bien que le nombre de jours avec précipitation soit resté constant sur la période 1901-2000, en moyenne 134 jours/an (voir Chapitre 4 « Base de données Paysage » et Annexe « Bd & Variable », sur un CD). Le nombre moyen de jours avec une température moyenne supérieure à 5°C est de 173 par an. La distribution de « Pluie » est étalée vers la droite et celle du nombre de « Jours avec Précipitations » est symétrique, alors que celle du nombre de « Jours avec $T > 5^{\circ}\text{C}$ » n'est pas caractéristique.

Morphologie : L'altitude médiane moyenne des communes est de 586m, avec une distribution symétrique légèrement orientée vers les altitudes élevées. Comme notre zone d'étude couvre essentiellement le Plateau suisse et le Jura, la distribution de « Relief » (différence l'altitude maximale) est décroissante, avec une moyenne de 277m. Les communes avec un relief important se situent dans les Préalpes, dans les contreforts du Jura (essentiellement la partie nord du canton de Berne) et dans le Lavaux (Puidoux et Chardonne). La distribution des communes selon leur surface relative avec une « Pente inférieure à 17% », est croissante, avec une moyenne de 67,9%, traduisant leur caractère peu accidenté.

Géographie : La grande majorité des communes de notre échantillon se situe dans les cantons de Berne, Argovie, Jura, Lucerne, Zürich et Bâle-Campagne, des cantons situés à distance intermédiaire entre les extrémités SO (Canton de Genève) et NE de notre zone d'étude (en moyenne 170 km), d'où une distribution selon la distance depuis Genève de forme symétrique.

Distribution spatiale

Les cartes reproduisant la zones d'étude et les 936 communes, avec leurs valeurs par variables ainsi qu'avec leur évolution par variables, figurent dans l'Annexe « Bd & Variables ». Sur ces cartes, certains regroupements spatiaux sont clairement visibles : Ainsi, les communes avec des valeurs importantes de « Bâtiment » (plus de 156 bâtiments/km²), « Population » (plus de 500 habitants/km²), « RouteEtRail » (plus de 312 m²/ha en '50, resp. 392 en '90), « Voiture » (plus de 20 voitures/km² en '50, resp. 100 en '90) et « Zone urbaine » (plus de 15%), sont rassemblées dans les agglomérations. Les communes-centres formant la zone centrale de l'agglomération se démarquent par les valeurs les plus élevées. On trouve, également au-dehors des agglomérations, des communes avec des surfaces

relatives de « RouteEtRail » importantes, par exemple entre Vevey et Fribourg, entre Lausanne et Yverdon, entre Lucerne et Olten, entre Fribourg, Bienne et Berne, c'est-à-dire le long des grands axes de transports.

Les évolutions de ces 5 variables urbaines sont en général plus marquées dans les communes appartenant à une agglomération que dans les autres communes, avec des valeurs extrêmes d'évolution pour les communes-centres. L'évolution de la population est, par contre, non seulement due à la variation globale du nombre d'habitant, mais également la conséquence de flux migratoires : les communes rurales ainsi que les communes-centres se dépeuplent, au profit des communes périphériques des agglomérations. En effet, on constate une diminution de la population dans les campagnes bernoise et jurassienne, ainsi que dans les communes de Zürich, Basel et Bern. En même temps, la population augmente fortement dans les communes à la périphérie de ces trois communes-centres, dans les alentours des agglomérations de Berne et de Bienne (BE), ainsi qu'autour des communes de Delémont et Porrentruy (JU).

Concernant l'évolution entre '50 et '90 des variables non-urbaines, les cartes de leurs distributions spatiales ne montrent pas de regroupements semblables, orientés autour d'une caractéristique qualitative des communes. Ainsi : la part de terre ouverte dans la SAU augmente beaucoup dans les cantons de JU, BE (centre), AG, LU (nord), TG, SH et VD (nord), alors qu'elle diminue dans les cantons de BE (partie sud-est), SG (sud), ZH (sud), SZ et BL ; la part de surfaces cultivées en maïs augmente beaucoup dans la partie nord-est des Préalpes ; La surface en verger intensif est importante en '50 près des grandes villes (Genève, Bern, Bienne, Zürich, Basel), et augmente beaucoup dans ces mêmes régions ; La main-d'œuvre augmente beaucoup dans les cantons de JU, BE (nord-ouest) ainsi que dans la commune de Genève) ; le nombre de tracteurs augmente beaucoup dans les cantons de BE, VD, LU, SG, TG et JU, alors qu'il diminue dans les cantons très urbains (BS, ZH, GE). Finalement, la SAU et les forêts évoluent de façon dispersée dans notre zone d'étude.

Les cartes des variables « Jours Précipitation » et « Jours $T > 5^{\circ}\text{C}$ » illustrent le gradient climatique, allant d'un climat clément dans la partie sud-ouest du pays (moins de 131.8 jours avec précipitations mais plus de 167.5 jours avec $T > 5^{\circ}\text{C}$) à un climat plus froid et pluvieux dans la partie nord-est de la zone d'étude. Ce dernier type de climat, défavorable pour le lièvre, se retrouve dans la partie ouest du canton du Jura ainsi que dans les Préalpes Fribourgeoises, phénomène probablement dû au relief avoisinant plus marqué.

Variables rapportées à la surface communale ou aux surfaces concernées (SAU, TO, SAU-TO)?

Les tendances qualitatives, montrées par les droites ajustées sur les moyennes, ne dépendent, en général, pas de cette distinction. Par contre, la position relative des droites ajustées sur les moyennes et sur les médianes varie en général moins lorsque les variables sont rapportées à la surface concernée, que lorsqu'elles sont rapportées à la surface communale : Par exemple, les deux droites ajustées sur les moyennes et les médianes du nombre de voitures rapporté à la surface communale (SC) divergent moins que lorsqu'il s'agit du nombre de voitures rapporté à la SAU. Même si les tendances montrées par les droites ajustées sur les moyennes sont les mêmes, les courbes dessinées par les moyennes peuvent être différentes, comme c'est le cas pour la population :

l'augmentation de la moyenne de « Population/SC » ralentit avec le temps, alors que celle de la moyenne de « Population/SAU » s'accélère. Dans d'autres cas, les deux courbes dessinées par les moyennes se suivent, par exemple, pour « Tracteur/SC » et « Tracteur/SAU ».

Les variables rapportées à SAU, TO et SAU-TO apportent une information complémentaire aux variables rapportées à SC. En effet, les valeurs rapportées aux surfaces concernées indiquent des surfaces relatives ou des densités sur une partie du paysage (des taches dans la commune), alors que les valeurs rapportées à la surface communale donnent les surfaces relatives ou les densités sur l'ensemble de l'échantillon de la zone d'étude. Nos variables rapportées à la surface agricole utile (SAU), à la surface en Terre ouverte (TO) ou encore à la surface agricole non terre ouverte (SAU-TO), font ressortir, par un comportement extrême, les communes dont les surfaces de SAU et de TO sont peu importantes, comme par exemple Hilterfingen et Aarberg, avec des « Population/SAU » et « Route&rail/SAU » extrêmement élevés. Cette différenciation a également été effectuée par différents auteurs, par exemple Mankin & Warner (1999) qui expriment la surface en forêt par unité de surface du comté (l'équivalent de surface communale (SC) dans notre étude), alors que les étendues de différents types de cultures sont rapportées à la surface agricole. Fjellstad & Dramstad (1999) expriment la surface agricole moyenne par unité de grandeur du domaine agricole, mais les étendues des différents types de cultures sont rapportées à la surface de la municipalité.

5.2.2 Analyse en Composantes Principales (ACP)

5.2.2.1 Résultat

Les résultats des six ACP ((A) : en '50, '60, '80, et '90 ; (B) : sur les valeurs de '50 et '60, puis sur les valeurs de '80 et '90) sont exprimés par la part de la variance totale expliquée par les trois premières composantes (Tab.5.3A et B) et par les poids des variables dans ces trois composantes (Tab.5.4 pour l'ACP (A) ; Annexe 5.2 pour l'ACP (B)).

Tab.5.3 : Participation à l'explication de la variance totale des trois premières composantes (C1, C2 et C3) des ACP sur la base de données « Paysage » (sans la variable « Agglomération appartenance », voir méthode) : (A) en 1950, 1960, 1980 et 1990 (N=936) ; (B) sur les valeurs de '50 et '60, et sur les valeurs en '80 et '90 (N=1'872).

(A)	Nom	Décennie	Part de la variance totale expliquée en %, N = 936			
			C1	C2	C3	Total de 3 premières composantes C1+C2+C3
	ACP50	'50	19.2	14.4	10.8	44.4
	ACP60	'60	19.1	15.5	10.9	45.5
	ACP80	'80	19.7	15.3	11.0	46.0
	ACP90	'90	19.9	14.6	10.6	45.1

(B)	Nom	Décennies	Part de la variance totale expliquée en %, N = 1'872			
			C1	C2	C3	Total de 3 premières composantes C1+C2+C3
	ACP50et60	'50 et '60	18.5	14.2	10.6	43.3
	ACP80et90	'80 et '90	19.5	14.7	10.7	44.9

La caractéristique urbaine cachée derrière la première composante principale C1

Les trois premières composantes, aux quatre décennies '50, '60, '80 et '90 (A), expliquent moins de la moitié de la variance totale (44.4%, resp. 45.5%, 46.0% et 45.1%). En même temps, un nombre relativement peu important de composantes (29, resp. 29, 30 et 30) peuvent être exclues, de façon certaine, car leur valeur propre est inférieure à 1. Ainsi, nous n'utiliserons pas cette ACP pour remplacer le grand nombre de variables de notre base de données par ces variables composées, tirées des premières composantes principales.

Pourtant, à chaque décennie '50, '60, '80 et '90, la première composante s'interprète d'une façon extrêmement intéressante. Bien qu'elle n'explique que 19.2%, resp. 19.1%, 19.7% et 19.9% de la variance, ça représente tout de même autant qu'expliqueraient 7 variables initiales (valeur propre = 7.5, resp.7.5, 7.6 et 7.6). Elle distingue les caractéristiques typiquement urbaines des caractéristiques non-urbaines, c'est-à-dire les variables « Bâtiment », « Population », « RouteEtRail », « Voiture » et « Zone urbaine » des autres variables. En effet, les poids de ces variables « urbaines » sont tous supérieurs à 0.2, et tous positifs, de surcroît (Tab.5.4).

Tab.5.4 : Poids des trois premières composantes C1, C2, C3 des ACP (A) aux quatre décennies ACP50, ACP60, ACP80 et ACP90 (N=936). Les poids dont la valeur absolue est supérieure ou égale à 0.250 sont grisés.

1950	C1	C2	C3	1960	C1	C2	C3
Part de la variance expliquée	19.2%	14.4%	10.8%	Part de la variance expliquée	19.1%	15.5%	10.9%
AgglDistance.50	-0.114	-0.076	0.035	AgglDistance.60	-0.100	-0.119	0.032
AgglTaille.50	0.159	-0.050	-0.031	AgglTaille.60	0.166	-0.001	-0.050
Batiment.50	0.316	-0.059	-0.096	Batiment.60	0.327	0.024	-0.079
Foret.50	-0.096	-0.264	0.052	Foret.60	-0.040	-0.260	0.028
Lait.50	0.091	0.066	-0.153	Lait.60	0.097	0.079	-0.141
Main.doeuvre.50	-0.029	0.346	-0.054	Main.doeuvre.60	-0.105	0.322	-0.065
MainDoeuvre.SAU.50	0.049	0.110	-0.067	MainDoeuvre.SAU.60	0.036	0.109	-0.133
Mais.50	0.081	0.138	0.151	Mais.60	0.047	0.078	0.133
Mais.SAU.50	0.140	0.070	0.148	Mais.SAU.60	0.080	0.009	0.129
Mais.to.50	0.108	0.070	0.068	Mais.to.60	0.068	0.000	0.003
Pluie10.50	-0.098	-0.072	-0.224	Pluie10.60	-0.075	-0.065	-0.239
Population.50	0.328	-0.087	-0.090	Population.60	0.341	0.002	-0.070
Population.SAU.50	0.296	-0.105	-0.050	Population.SAU.60	0.301	-0.018	-0.043
RouteEtRail.50	0.313	0.031	-0.048	RouteEtRail.60	0.309	0.109	-0.033
RouteEtRail.SAU.50	0.310	-0.114	-0.039	RouteEtRail.SAU.60	0.314	-0.026	-0.042
RouteNationale.50	0.000	-0.007	-0.023	RouteNationale.60	0.075	0.039	0.008
RouteNationale.SAU.50	-0.001	-0.010	-0.028	RouteNationale.SAU.60	0.087	0.020	-0.010
SAU.50	-0.053	0.362	-0.030	SAU.60	-0.132	0.325	0.008
SubventionAF.50	0.048	0.029	-0.155	SubventionAF.60	0.016	-0.030	0.117
TailleParcelle.50	-0.015	0.031	-0.187	TailleParcelle.60	-0.010	-0.013	-0.142
TerreOuvverte.50	0.011	0.290	0.273	TerreOuvverte.60	-0.051	0.253	0.316
TerreOuvverte.SAU.50	0.104	0.137	0.357	TerreOuvverte.SAU.60	0.035	0.141	0.395
Tracteur.50	-0.018	0.314	-0.172	Tracteur.60	-0.085	0.321	-0.091
Tracteur.SAU.50	0.034	0.147	-0.201	Tracteur.SAU.60	0.053	0.123	-0.139
Vache.50	-0.022	0.333	-0.208	Vache.60	-0.114	0.311	-0.201
Vache.SAU.50	0.051	0.183	-0.297	Vache.SAU.60	-0.053	0.212	-0.329
Vache.SAU.to.50	0.101	0.074	0.023	Vache.SAU.to.60	-0.038	0.306	-0.024
Verger.50	0.059	0.021	0.101	Verger.60	0.058	0.053	0.082
Verger.SAU.50	0.114	-0.009	0.093	Verger.SAU.60	0.103	0.016	0.071
Voiture.50	0.329	-0.071	-0.031	Voiture.60	0.334	0.009	-0.026
Voiture.SAU.50	0.291	-0.096	-0.031	Voiture.SAU.60	0.295	-0.017	-0.025
ZoneUrbaine.50	0.315	-0.049	-0.097	ZoneUrbaine.60	0.317	0.041	-0.090
AltitudeMediane	-0.161	-0.185	-0.077	AltitudeMediane	-0.140	-0.209	-0.117
Pentelnf17	0.119	0.246	0.108	Pentelnf17	0.074	0.268	0.130
Position	0.003	0.027	-0.324	Position	0.015	0.050	-0.309
Relief	-0.105	-0.263	-0.122	Relief	-0.060	-0.267	-0.149
SolDefavorable	-0.007	0.102	-0.146	SolDefavorable	-0.027	0.101	-0.142
JoursPrécipitations	-0.113	-0.124	-0.280	JoursPrecipitation	-0.080	-0.127	-0.287
Jours T>5°C	0.022	-0.059	0.331	Jours T>5°C	0.030	-0.073	0.329

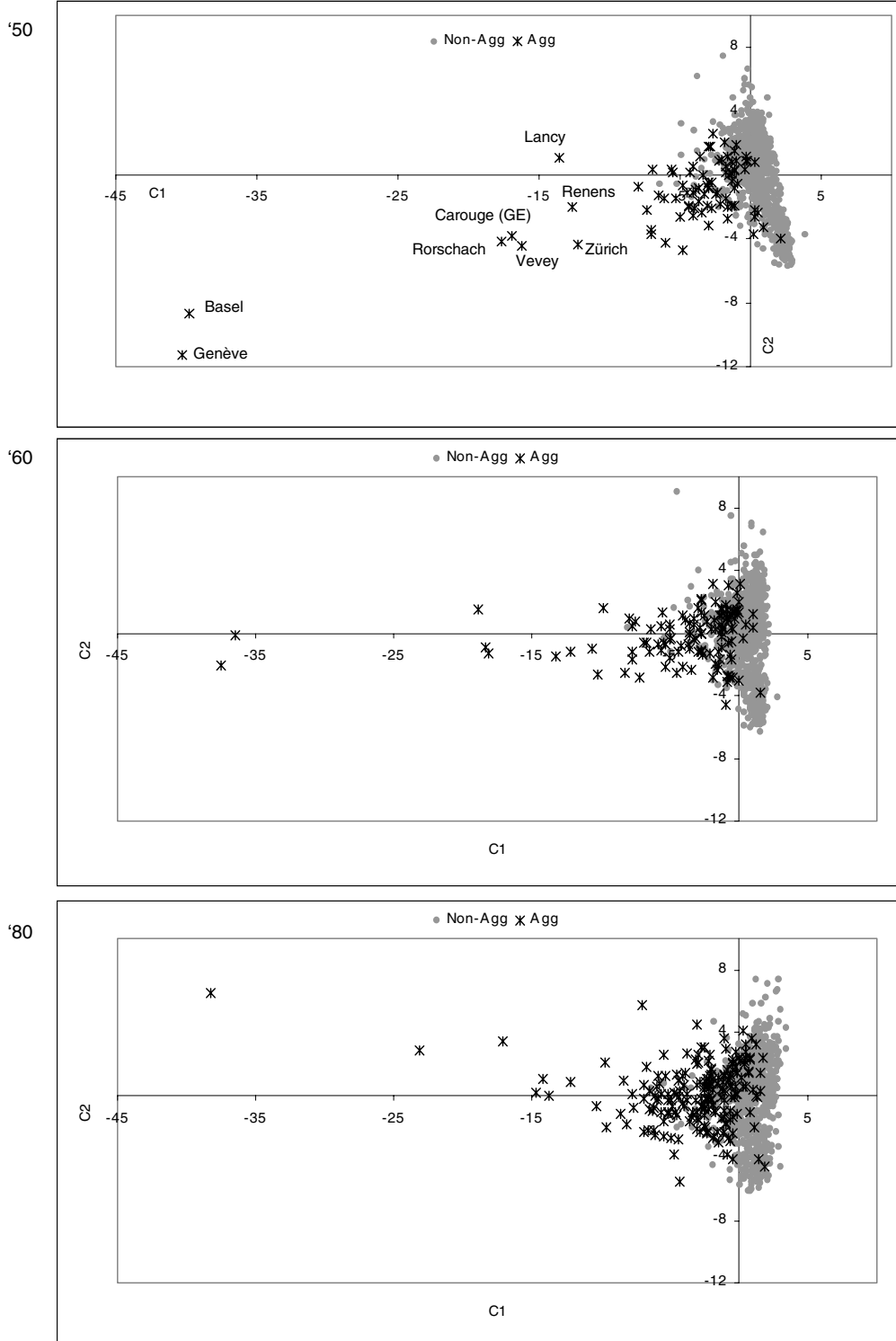
Tab.5.4 (suite) : Poids des trois premières composantes C1, C2, C3 des ACP (A) aux quatre décennies ACP50, ACP60, ACP80 et ACP90 (N=936). Les poids dont la valeur absolue est supérieure ou égale à 0.250 sont grisés.

1980	C1	C2	C3	1990	C1	C2	C3
Part de la variance expliquée	19.7%	15.3%	11.0%	Part de la variance expliquée	19.9%	14.6%	10.6%
AgglDistance.80	-0.119	-0.115	-0.003	AgglDistance.90	-0.140	-0.102	-0.004
AgglTaille.80	0.175	-0.006	-0.016	AgglTaille.90	0.179	-0.010	0.004
Batiment.80	0.298	0.046	-0.073	Batiment.90	0.301	0.018	-0.075
Foret.80	-0.015	-0.297	0.144	Foret.90	-0.035	-0.295	0.179
Lait.80	0.105	0.019	0.072	Lait.90	0.122	0.077	0.070
Main.doeuvre.80	-0.171	0.259	-0.183	Main.doeuvre.90	-0.151	0.276	-0.195
MainDoeuvre.SAU.80	0.100	0.116	-0.230	MainDoeuvre.SAU.90	0.070	0.103	-0.233
Mais.80	-0.064	0.256	0.109	Mais.90	-0.055	0.268	0.091
Mais.SAU.80	0.009	0.172	0.178	Mais.SAU.90	0.024	0.164	0.179
Mais.to.80	-0.030	0.003	-0.178	Mais.to.90	-0.025	-0.032	-0.179
Pluie10.80	-0.074	-0.132	-0.203	Pluie10.90	-0.088	-0.132	-0.106
Population.80	0.323	0.041	-0.124	Population.90	0.321	0.003	-0.144
Population.SAU.80	0.232	0.038	-0.162	Population.SAU.90	0.210	-0.002	-0.178
RouteEtRail.80	0.300	0.086	-0.055	RouteEtRail.90	0.307	0.062	-0.061
RouteEtRail.SAU.80	0.266	0.030	-0.151	RouteEtRail.SAU.90	0.247	-0.009	-0.177
RouteNationale.80	0.105	0.022	-0.007	RouteNationale.90	0.111	0.011	0.027
RouteNationale.SAU.80	0.116	-0.028	-0.003	RouteNationale.SAU.90	0.120	-0.049	0.035
SAU.80	-0.199	0.255	-0.096	SAU.90	-0.191	0.281	-0.112
SubventionAF.80	-0.073	0.090	-0.001	SubventionAF.90	-0.130	-0.017	-0.033
TailleParcelle.80	-0.092	-0.044	-0.140	TailleParcelle.90	-0.098	-0.066	-0.095
TerreOuvrte.80	-0.062	0.294	0.235	TerreOuvrte.90	-0.054	0.311	0.219
TerreOuvrte.SAU.80	0.043	0.220	0.340	Terreouvverte.SAU.90	0.056	0.219	0.340
Tracteur.80	-0.167	0.268	-0.184	Tracteur.90	-0.162	0.285	-0.201
Tracteur.SAU.80	0.082	0.124	-0.203	Tracteur.SAU.90	0.064	0.119	-0.217
Vache.80	-0.199	0.201	-0.285	Vache.90	-0.196	0.196	-0.295
Vache.SAU.80	-0.168	0.097	-0.324	Vache.SAU.90	-0.158	0.060	-0.336
Vache.SAU.to.80	-0.093	0.233	-0.004	Vache.SAU.to.90	-0.037	0.173	0.044
Verger.80	0.026	0.073	-0.019	Verger.90	0.039	0.087	-0.028
Verger.SAU.80	0.050	0.061	-0.012	Verger.SAU.90	0.063	0.071	-0.017
Voiture.80	0.321	0.045	-0.125	Voiture.90	0.321	0.011	-0.143
Voiture.SAU.80	0.224	0.038	-0.160	Voiture.SAU.90	0.210	0.000	-0.178
ZoneUrbaine.80	0.309	0.066	-0.054	ZoneUrbaine.90	0.316	0.036	-0.062
AltitudeMediane	-0.147	-0.236	-0.145	AltitudeMediane	-0.176	-0.232	-0.144
Pentelnf17	0.060	0.303	0.089	Pentelnf17	0.086	0.307	0.080
Position	0.008	-0.007	-0.153	Position	0.026	-0.009	-0.122
Relief	-0.048	-0.292	-0.103	Relief	-0.074	-0.298	-0.084
SolDefavorable	-0.039	0.092	-0.121	SolDefavorable	-0.027	0.094	-0.109
JoursPrecipitation	-0.081	-0.177	-0.192	JoursPrecipitation	-0.092	-0.175	-0.161
Jours T>5°C	0.056	-0.016	0.280	Jours T>5°C	0.049	-0.012	0.269

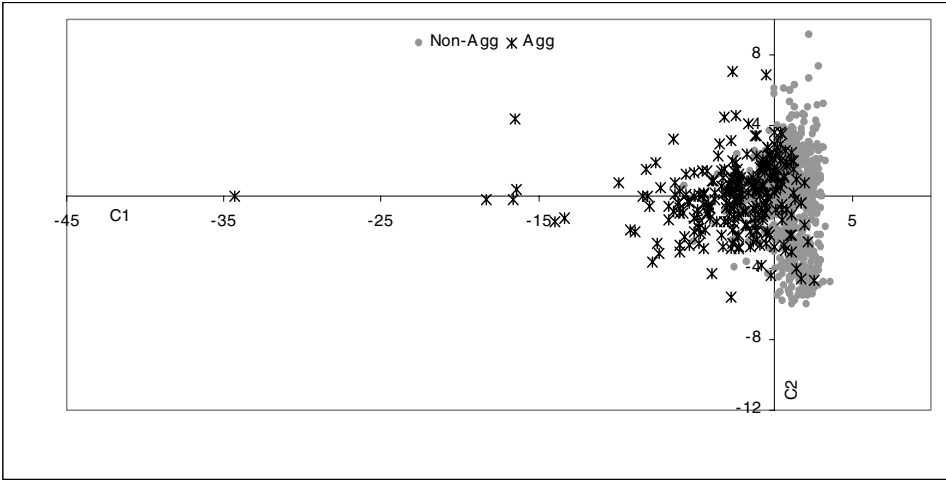
La projection des communes, dans le plan défini par les deux premières composantes principales (C1,C2), confirme cette observation (Fig.5.2) : les communes qui se trouvent le long de la partie gauche de l'axe C1 sont effectivement des communes très urbaines : Genève, Basel, Carouge (GE), Rorschach, Vevey, Lancy Renens et Zürich se distinguent nettement des communes regroupées à l'extrémité droite de l'axe. D'ailleurs, lorsqu'on fait apparaître l'état de la variable « Agglomération appartenance » (qui a été retirée de la base de données avant d'effectuer l'ACP, rappelons-le), le nuage des communes appartenant à une agglomération se distingue du nuage des communes n'appartenant pas à une agglomération par sa position décalée vers la gauche de l'axe C1. Cet axe peut donc être compris comme la caractéristique « urbaine » du paysage, typique des communes appartenant à une agglomération, et donc opposant les communes de type urbain, appartenant à une agglomération, aux communes de type moins urbain, n'appartenant pas à une agglomération.

Fig.5.2 : Projection des communes dans le plan défini par les deux premières composantes principales (C1,C2) des ACP (A) (voir Tab.5.3) : (a) ACP50, ACP60, ACP80 et ACP90 : avec l'état de la variable éliminée préliminairement « Agglomération appartenance » (N=936) ; (b) ACP90 : avec l'indication en couleur du canton auquel la commune appartient. Seules les communes des cantons qui présentent un certain regroupement dans le plan (C1,C2) sont représentées, c'est-à-dire 244 (ne sont pas représentés : les cantons de BE, SZ, ZG, BS, BL, SH, SG, AG, TG et VD).

(a)

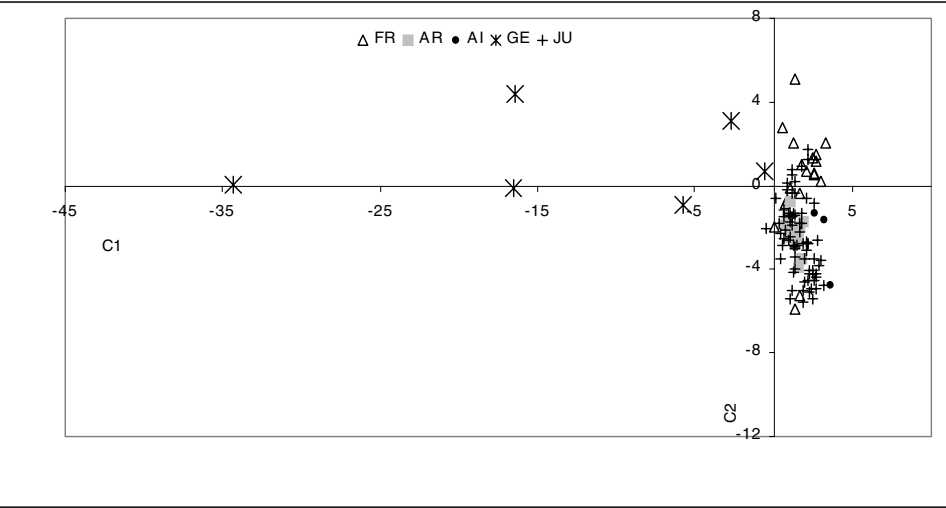
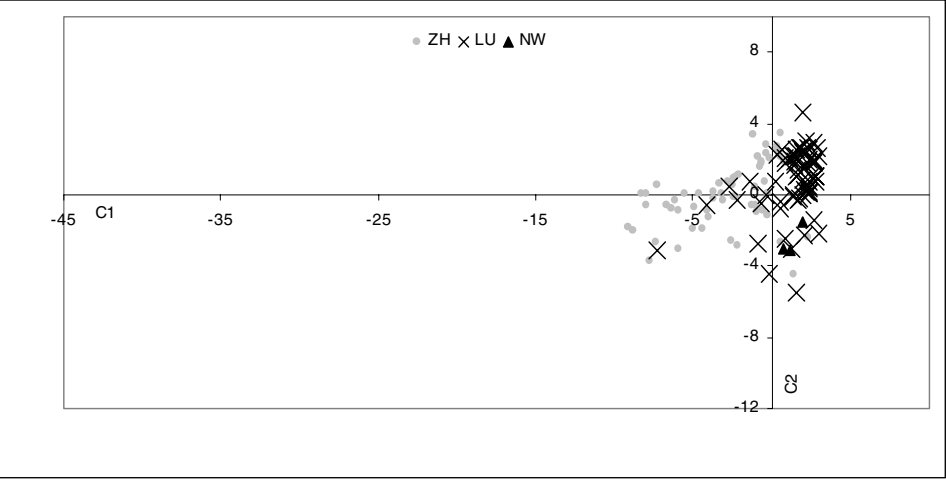


'90



(b)

'90



Deux groupes de communes se distinguent, l'un avec les communes appartenant à une agglomération, l'autre avec les communes n'appartenant pas à une agglomération. Ils permettent ainsi de définir deux sous-échantillons, selon l'état de la variable « Appartenance agglomération » : Agg et Non-Agg. Le nombre de communes appartenant à Agg et Non-Agg durant les quatre décennies est donné dans Fig.5.3. Les communes montrent une certaine tendance de regroupement par cantons, dans le plan défini par les deux premières composantes principales (C1,C2), en particulier les communes des cantons ZH, LU, NW, FR, AR, AI, GE, JU (Fig.5.2b).

Dynamique de la caractéristique urbaine

Les premières composantes en '50, '60, '80 et '90 s'interprètent de façon très analogue : d'une décennie à l'autre, les poids des variables possèdent des valeurs relatives semblables (Tab.5.4). Mais les combinaisons linéaires des variables qui les définissent ne sont pas exactement pareilles. Pour suivre l'évolution entre les décennies des communes le long de cet axe C1, il est donc nécessaire d'effectuer une ACP sur l'ensemble des décennies à comparer pour identifier un nouvel axe, correspondant à un « compromis » entre ces quatre décennies. Comme '50 et '60 ne sont que difficilement comparables avec '80 et '90 (voir 5.1.3), nous avons effectué deux ACP distinctes, l'une en groupant les valeurs de '50 et '60 (ACP50et60, Tab.3B), l'autre en groupant les valeurs de '80 et '90 (ACP80et90, Tab.3B), afin de suivre les communes entre '50 et '60, puis entre '80 et '90. Les résultats de ces deux ACP sont exprimés par la part de la variance expliquée par les trois premières composantes (Tab.3B) et par les poids des variables dans ces trois composantes (Annexe 5.2).

La moyenne des deux sous-échantillons, selon leur coordonnée sur C1 (\pm erreur standard de la moyenne), les différencie à chacune des quatre décennies (Fig.5.3a) : entre '50 et '60, elle passe de -3.36 ± 0.57 à -4.63 ± 0.59 pour Agg, et de 0.63 ± 0.03 à 0.37 ± 0.05 pour Non-Agg ; entre '80 et '90, elle passe de -2.64 ± 0.27 à -2.97 ± 0.25 pour Agg et de 1.08 ± 0.05 à 0.74 ± 0.05 pour Non-Agg. Ainsi, bien que les sous-échantillons se chevauchent, il ressort clairement que les variables « Paysage » permettent de mettre en évidence la caractéristique urbaine des communes, ainsi que leur tendance à l'urbanisation.

La caractéristique urbaine se renforce pour les deux sous-échantillons Agg et Non-Agg entre '50 et '60, mais de façon plus marquée pour les communes appartenant à une agglomération que pour les communes n'appartenant pas à une agglomération (Fig.5.3b) : • '50-'60 est de -1.27 pour Agg et de -0.26 pour Non-Agg. La différence entre Agg et Non-Agg s'accroît donc avec le temps. Il est probable que cette tendance soit due à une minorité de communes qui évoluent fortement dans ce sens, du fait que les médianes et les moyennes de Agg et de Non-Agg divergent légèrement, montrant qu'une grande partie des communes développent moins rapidement leur caractéristique urbaine.

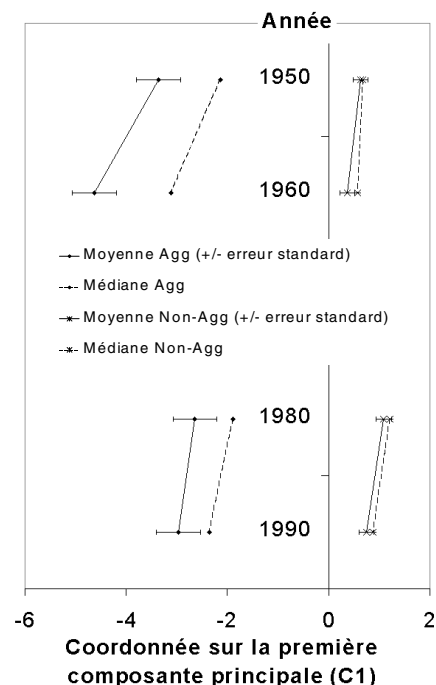
Fig.5.3 : a) Valeurs caractéristiques des coordonnées selon la première composante principale C1 des sous-échantillons Agg et Non-Agg. Les valeurs '50 et '60 sont le résultat de l'ACP50et60 sur l'ensemble des valeurs de '50 et '60 (N=1'872), celles de '80 et '90 sont le résultat de l'ACP80et90 sur l'ensemble des valeurs de '80 et '90 (N=1'872). b) Evolution de ces mêmes moyennes et médianes entre '50 et '60 ainsi qu'entre '80 et '90.

a)

	Non-Agg 1950	Non-Agg 1960	Non-Agg 1980	Non-Agg 1990
Minimum	-5.00	-9.27	-5.83	-6.17
Maximum	3.18	3.07	3.85	3.08
Moyenne	0.63	0.37	1.08	0.74
Médiane	0.67	0.57	1.21	0.88
Erreur standard de la moyenne	0.03	0.05	0.05	0.05
Écart-type	1.00	1.30	1.24	1.23
Nombre d'unités	853	815	737	675

	Agg 1950	Agg 1960	Agg 1980	Agg 1990
Minimum	-30.63	-43.70	-31.31	-39.69
Maximum	1.87	1.79	2.11	1.78
Moyenne	-3.36	-4.63	-2.64	-2.97
Médiane	-2.14	-3.11	-1.89	-2.36
Erreur standard de la moyenne	0.57	0.59	0.27	0.25
Écart-type	5.22	6.49	3.79	4.06
Nombre d'unités	83	121	199	261

b)

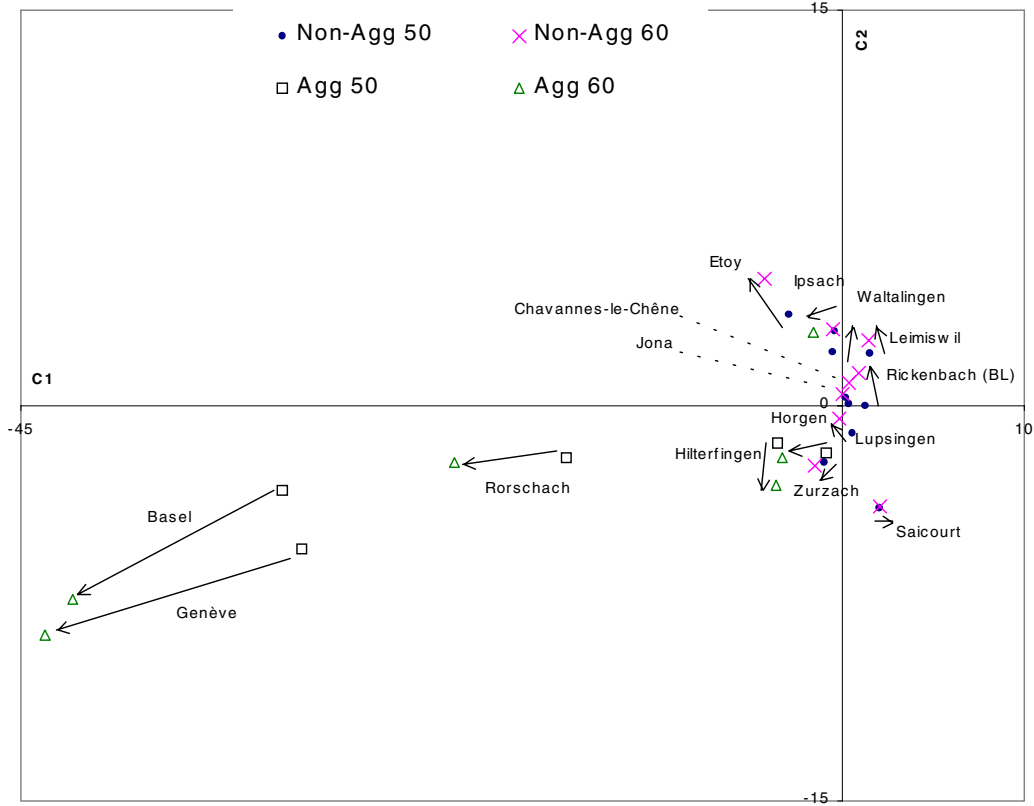


Entre '80 et '90, la dynamique va également en direction d'un développement urbain (Fig.5.3b) mais, cette fois, elle est aussi importante pour le sous-échantillon Non-Agg que pour le sous-échantillon Agg (de -0.34 pour Non-Agg et de -0.33 pour Agg). Cette évolution ne semble pas être due à quelques communes qui se développent de façon extraordinaire, mais elle paraît plutôt généralisée pour toutes les communes Non-Agg, étant donné que l'évolution de la médiane est parallèle à celle de la moyenne. Pour les communes Agg, il semblerait que ce soit la grande majorité des communes qui développent leur caractéristique urbaine. En effet, on constate que, cette fois, la médiane évolue plus rapidement que la moyenne en direction de l'urbain.

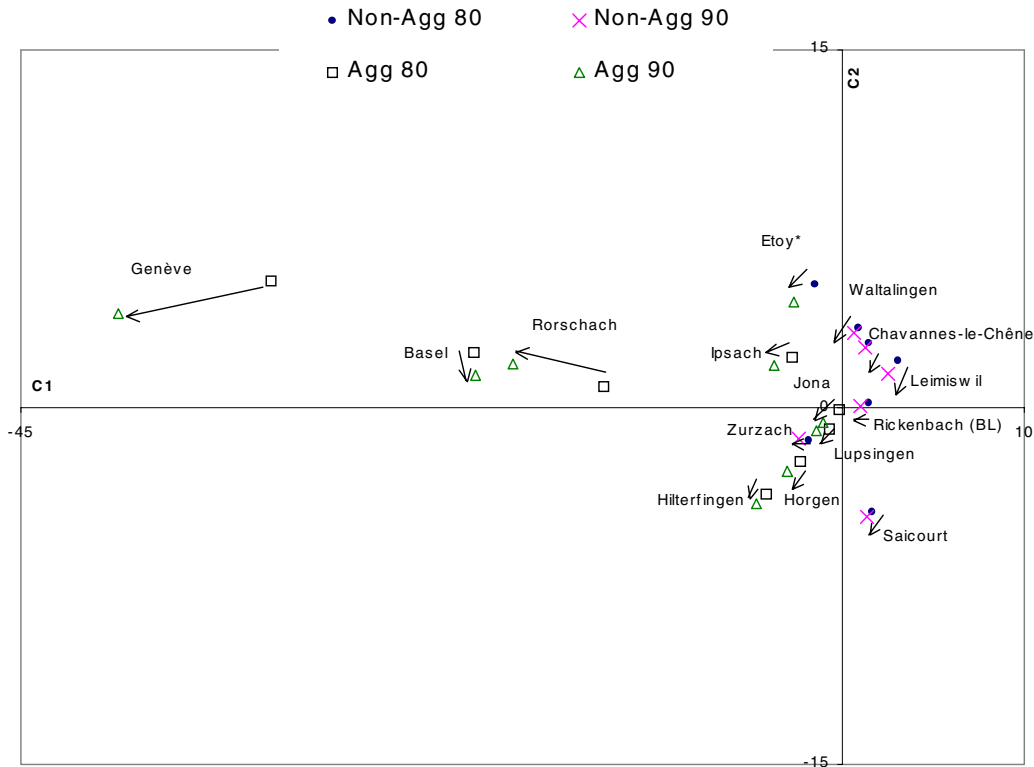
Les dynamiques de 15 communes sont reportées, comme exemples de dynamiques individuelles, sur le plan (C1,C2) formé par les deux premières composantes principales (Fig.5.4). Il s'agit de 12 communes, parmi les 30 communes-exemples montrées dans l'Annexe « Bd & Variables », additionnées de Genève, Basel et Rorschach, les trois communes les plus urbaines sur ces graphiques. Entre '50 et '60, la majorité de communes évoluent vers l'extrémité urbaine de l'axe C1, même si cette évolution est seulement très légère pour certaines, alors que deux communes, Saicourt et Waltalingen, évoluent très légèrement dans le sens opposé. Entre '80 et '90, toutes les communes ont une évolution en direction de l'urbain, sauf cette fois Basel, qui montre une très légère évolution dans la direction inverse. Deux communes passent du sous-échantillon Agg au sous-échantillon Non-Agg (Ipsach entre '50 et '60 ; Etoy entre '80 et '90), sans que le déplacement le long de l'axe C1 soit plus marqué que celui des autres communes.

Fig.5.4 : Evolution de 15 communes-exemples dans le plan formé par les deux premières composantes principales, avec indication de l'appartenance ou non à une agglomération : a) ACP50et60 ; b) ACP80et90. * Communes qui entrent dans une agglomération entre '50 et '60 (Ipsach) ou entre '80 et '90 (Etoy). Les coordonnées en '50 et '60 ne sont pas directement comparables aux coordonnées en '80 et '90 (voir texte).

a)



b)



Remarquons que certains de ces déplacements, extrêmement peu marqués, peuvent être simplement dus au fait que les composantes C1 de '50-'60, resp. '80-'90, sont des compromis entre les composantes C1 de '50 et '60, resp. '80 et '90.

Les facteurs « écologiques » cachés derrière les composantes principales C2 et C3

Les deuxièmes et troisièmes composantes principales C2 et C3, à chacune des quatre décennies, ne s'interprètent pas aussi facilement que C1 (Tab.5.4). Nous proposons tout de même deux hypothèses :

- La deuxième composante C2 (Tab.5.4) distingue de l'ensemble des variables, celles qui décrivent le type d'utilisation du sol non-urbain (« Forêt » et « SAU »), ainsi que le type de pratiques agricoles (« Main-d'œuvre », « Tracteur », « Vache »), influencées par la topographie (« Relief »).
- La troisième composante C2 (Tab.5.4) distingue des variables caractéristiques du type d'agriculture pratiquée : plutôt de type culture ouverte (« Terre ouverte »), ou plutôt de type prairies et pâturages (« Vache »), choix influencé, en partie, par les conditions climatiques (« Jours précipitation », « Jours T5°C », « Pluie » et « Position »).

Ces deux hypothèses semblent très attrayantes, même si la dernière est relativement faible en '80 et '90. Mais l'observation des projections des communes dans le plan construit sur les axes C2 et C3, montre que le nuage de points n'est pas structuré (Annexe 5.3), ce qui ne permet pas de distinguer des groupes de communes selon les caractéristiques postulées ci-dessus.

5.2.2.2 Discussion

Notre analyse par ACP aboutit à la mise en évidence du développement d'une opposition entre le caractère urbain et le caractère non-urbain, sur la première composante principale (C1), permettant de distinguer deux sous-échantillons de communes : celles appartenant à une agglomération (Agg) et celles n'appartenant pas à une agglomération (Non-Agg). Notre analyse montre également un certain regroupement des communes par cantons dans le plan formé par les deux premières composantes (C1,C2). Ces deux caractéristiques des communes (leur appartenance à une agglomération et leur appartenance à un canton déterminé) sont des descripteurs qui qualifient seulement une partie des aspects du paysage. D'ailleurs, la part de la variabilité totale expliquée par la première composante principale (C1) n'atteint pas 20%, et celle des trois premières composantes principales (C1, C2 et C3) n'atteint pas 50%. Sur la base de ce résultat, relativement faible, nous choisissons de ne pas utiliser cette ACP pour remplacer un certain nombre de variables par ces deux caractéristiques, comme c'est l'habitude suite à une telle analyse. Notre analyse n'apporte donc pas de nouveauté, mais permet de vérifier que les variables « Paysage », contenues dans la base de données, reflète bien le système urbain (appartenance ou non à une agglomération) et administratif (rattachement aux cantons).

D'autres auteurs ont utilisé la technique des ACP comme outil d'analyse préliminaire pour aboutir à un résultat limité. Par exemple, Agger & Brandt (1988) qui tentent d'analyser le pattern créé par des biotopes, en cherchant à exprimer leurs combinaisons, mais sans succès, probablement, selon eux, à cause de problèmes techniques liés à la taille des carrés étudiés. Ces auteurs concluent qu'il est

préférable de faire une analyse de ce type sur une plus grande zone. Par contre, Burel & Baudry (1999) examinent avec succès la direction des changements structurels entre 1952 et 1988 d'une commune, en France, par analyse en correspondance factorielle. Cette technique dérive de l'ACP et permet d'analyser une base de données constituée de variables catégorielles uniquement. Elle est également utilisée pour analyser les résultats de Pegase, comme l'ont fait Phipps et al. (1986).

Notre ACP permet de suivre l'évolution de la caractéristique urbaine des communes entre '50 et '60 ainsi qu'entre '80 et '90 : les communes appartenant à une agglomération ainsi que celles n'appartenant pas à une agglomération, évoluent en moyenne en direction de l'urbain. Cette tendance est plus marquée entre '50 et '60 pour les communes appartenant à une agglomération que pour celles n'appartenant pas à une agglomération, alors qu'elle est parallèle entre '80 et '90 pour les deux sous-échantillons Agg et Non-Agg. Skanes & Bunce (1996), qui utilisent l'ACP pour déterminer le déplacement de 54 unités spatiales, pendant les 200 dernières années, sur les principaux gradients écologiques, tirent également des conclusions sur l'évolution moyenne du paysage en Suède : Ils concluent que le paysage se transforme graduellement en un paysage dominé par les forêts, et que les activités agricoles pourraient éventuellement être abandonnées sur les zones les moins favorables aux cultures. L'ACP est donc un outil utile pour résumer, interpréter et illustrer l'amplitude et la différence de direction dans les changements du paysage, en complément avec les techniques traditionnelles d'analyses spatiales de données géographiques.

Notre ACP montre des relations entre certaines variables de notre base de données « Paysage » : en particulier, elle rassemble les variables qui ont trait à l'urbanisation (« Bâtiment », « Population », « RouteEtRail », « Voiture » et « Zone urbaine ») et qui se distinguent sur la première composante principale (C1). Sans trop nous avancer, nous posons les hypothèses que l'ACP rassemble les variables en relation avec l'utilisation du sol non-urbain et les pratiques agricoles sur ces terres (« Forêt », « SAU », « Main-d'œuvre », « Tracteur » et « Vache ») (C2), et éventuellement les variables qui donnent une indication sur le type d'agriculture en général, en terre ouverte ou en prairies et pâturages (« Terre ouverte », « Vache ») (C3).

5.3 Conclusion

Les outils de description de la base de données et de la dynamique du paysage

Chaque type de graphiques est utile pour avoir une bonne connaissance des variables descriptives du paysage. Ces graphiques permettent une acquisition de l'information par étapes : en premier, le graphique traçant les évolutions de la moyenne et de la médiane entre '50 et '90, permet d'avoir la toute première image d'une variable. Ensuite, le graphique donnant l'évolution des valeurs des 30 communes comme exemples. Puis les histogrammes '50, '60, '70, '80 et '90 qui donnent une image grossière de la répartition des valeurs sur l'étendue totale. Viennent ensuite les boxplots '50, '60, '70, '80 et '90 qui vont davantage dans le détail de la répartition, et qui ajoutent un « jugement » sur les

valeurs sortant du lot en les classant dans les valeurs extrêmes ou dans les moustaches. Les cartes de distribution géographique sont présentées ici dans un but plus illustratif que descriptif.

Finalement, les histogrammes, boxplots et graphiques d'évolution de la moyenne et de la médiane sur les différences entre les décennies '50 et '60, '60 et '70, '70 et '80, '80 et '90 (nommées $\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$ et $\Delta 80-90$), qui sont plus difficiles à lire, mais qui n'en restent pas moins indispensables. Ils permettent de faire la distinction entre une variable pour laquelle toutes les valeurs évoluent peu et dans la même direction, d'une variable pour laquelle les valeurs évoluent beaucoup mais dans des directions opposées, ce qui n'apparaît pas forcément sur les histogrammes et boxplots des valeurs par décennies ('50, '60, '70, '80 et '90).

Dynamique du paysage

La dynamique présentée par les variables correspond aux conclusions de l'OFS (2001) fournies par leur étude de l'évolution de l'ensemble du territoire suisse entre 1980 et 1990, basée sur les statistiques de la superficie de l'OFS distribuée par GEOSTAT pour 1979/85 et 1992/97 : extension des zones urbaines et des réseaux de communication (surfaces d'infrastructure), accompagnée de l'augmentation du nombre de bâtiments d'habitation hors des zones urbaines et de la population, extension des agglomérations, intensification des pratiques agricoles, concentrées sur une SAU dont l'étendue diminue, climat en légère évolution avec davantage de pluie et un réchauffement constaté à partir de 1980.

ACP

La base de données comporte un nombre élevé de variables, que nous n'avons pas réduit par une ACP simple, la part de variance expliquée par les trois premières composantes étant relativement faible (44.4% en '50, 45.5% en '60, 46.0% en '80 et 45.1% en '90). Notre analyse par ACP aboutit tout de même à la mise en évidence :

- D'une opposition clairement marquée, selon la première composante principale (C1), entre le caractère urbain et non-urbain des communes, permettant de distinguer deux sous-échantillons de communes : celles appartenant à une agglomération (Agg) et celles n'appartenant pas à une agglomération (Non-Agg). Ces deux sous-échantillons évoluent, en moyenne, en direction de l'urbain, de façon plus marquée pour Agg que pour Non-Agg entre '50 et '60, alors qu'entre '80 et '90, les deux sous-échantillons évoluent de façon parallèle.
- D'un certain regroupement des communes par cantons, dans le plan (C1,C2) construit sur les axes correspondant aux deux premières composantes principales.
- De relations entre certaines variables de notre base de données « Paysage » : en particulier, l'ACP rassemble les variables qui ont trait à l'urbanisation (« Bâtiment », « Population », « RouteEtRail », « Voiture » et « Zone urbaine ») et qui se distinguent sur la première composante principale (C1). C1 « pèse », dans l'explication de l'organisation de la base de données, autant que 7 variables initiales.

Cette analyse n'apporte donc pas de nouveauté, mais permet de vérifier que les variables « Paysage » contenues dans la base de données reflète bien le système urbain (appartenance ou non à une agglomération) et administratif (rattachement aux cantons). Elle permet également de montrer une dynamique des communes en direction de l'urbain, que ce soient les communes appartenant à une agglomération ou les communes n'appartenant pas à une agglomération.

Distribution spatiale

Les variables qui ont trait à l'urbanisation (« Bâtiment », « Population », « RouteEtRail », « Voiture » et « Zone urbaine »), et dont la combinaison forme la première composante principale de notre ACP, regroupent effectivement autour des agglomérations les communes dont les valeurs de ces variables sont élevées. Les surfaces relatives de routes et rail sont également importantes dans les communes qui se trouvent sur les grands axes de transports, par exemple entre Vevey et Fribourg, entre Lausanne et Yverdon, entre Lucerne et Olten, entre Fribourg, Bienne et Berne.

L'évolution de la population est essentiellement la conséquence de flux migratoires : les communes rurales et les communes-centres se dépeuplent au profit des communes périphériques des agglomérations.

L'observation de ces cartes ne nous permet pas d'aller plus loin dans l'identification d'une structure, d'une logique dans la distribution spatiale des valeurs. Pour cela, il serait nécessaire d'effectuer une analyse quantitative : analyser la distribution des variables par cantons, par régions géographiques (Jura, Plateau, Préalpes), par régions morphologiques (en fonction de l'altitude, de la pente), etc.

Variables rapportées à la surface communale ou aux surfaces concernées (SAU, TO, SAU-TO)?

Les variables rapportées à SAU, TO et SAU-TO apportent une information complémentaire aux variables rapportées à surface communale (SC). Les premières donnent la concentration sur des taches du paysage, sous-échantillon de nos communes, alors que les secondes donnent une représentation de la concentration sur l'ensemble de la surface de l'échantillon. Il est important de remarquer que les tendances qualitatives montrées par les droites ajustées sur les moyennes ne dépendent en général pas de cette distinction. Elle devient pourtant indispensable dès le moment où il s'agit de comparer un groupe qui comporte des communes de caractère urbain et des communes de caractère rural : un certain nombre de tracteurs à Genève n'a pas la même signification que le même nombre de tracteur à Uebschi. La suite de cette étude nous dira si certaines variables n'ont pas de raison d'être dans cette base de donnée « Paysage ».

Erreurs et valeurs illogiques

Les boxplots et le graphique d'évolution des valeurs des 30 communes sont des instruments pour détecter, de façon visuelle, les erreurs lors d'estimations et erreurs méthodologiques, affectant, en général, un groupe de communes. Cette méthode graphique est d'une efficacité limitée pour le contrôle systématique, mais elle permet de détecter les fautes de frappes et autres erreurs

ponctuelles ou valeurs illogiques qui introduisent des valeurs sortant du lot. Elles ont été corrigées par différents artifices (voir chapitre « Base de données Paysage » : Estimation des valeurs manquantes).

Limites d'utilisation de la base de données

Ces descriptions des variables confirment la mise en garde que nous avons indiquée dans le chapitre « Base de données Paysage » : les valeurs des années 1950, 60 et 70 des variables « Forêt/SC », « Route&rail/SC », « Route&rail/SAU » et « Zone urbaine/SC » ne peuvent pas être comparées aux valeurs des années 1980 et 90. Cette conclusion est très importante pour l'exécution et l'interprétation des analyses de la base de données : (1) Les ACP effectuées dans ce chapitre, les matrices de corrélations et la régression multiple calculées au chapitre 7, à chaque décennie, doivent être comparées en gardant à l'esprit que certaines variables en 1980 et en 1990 ne décrivent pas les mêmes objets que les variables portant le même nom en 1950, 1960 et 1970. On peut s'attendre à des différences notables. (2) Nous devons exclure les valeurs donnant l'évolution 70-80 ($\Delta 70-80$) des variables « Forêt/SC », « Route&rail/SC », « Route&rail/SAU » et « Zone urbaine/SC », parce qu'une part inconnue de l'évolution est due à ces différences méthodologiques et non pas à la dynamique réelle. Nous partons de l'hypothèse que l'évolution $\Delta 80-90$ n'est pas influencée de la même manière et qu'elle peut être comparée aux évolutions $\Delta 50-60$ et $\Delta 60-70$.

Les apports de ce chapitre pour notre recherche

Les 40 variables que nous avons rassemblées dans la base de données « Paysage » constituent une source d'information volumineuse. La qualité et la signification des données de différents types (statistiques ou cartographiques, communales, cantonales ou échantillonnées, raster ou vecteur, etc) ont pu être comparées et vérifiées. Nous avons défini un ensemble de graphiques et cartes qui nous ont permis de décrire une partie des caractéristiques de ces variables (valeurs à chaque décennie, et évolution des valeurs d'une décennie à l'autre). Nous n'avons pas réduit le nombre de variables par la technique des ACP, mais nous avons extrait les informations nécessaires à la suite de notre recherche, concernant la structure de cette base de données, ainsi que concernant l'importance relative des variables.

Les analyses menées dans les chapitres 6 « Le lièvre et le paysage » et 7 « Dynamique du paysage en fonction des variables clés », portent sur des extraits de cette base de données « Paysage », qui peut donc être, dès à présent, considérée comme une plate-forme fiable et utile, pour comparer les valeurs des variables à différentes époques et dans différentes communes, en connaissant leurs définitions, significations et limites d'utilisations.

Chapitre 6

Le lièvre et le paysage

Ce chapitre présente une étude de la relation entre le lièvre brun et le paysage dans les années '80. Le but est de déterminer quelles sont les variables clés du paysage, pour expliquer la relation entre la population de lièvres et les 40 variables décrivant le paysage dans son état en '80, à l'aide du modèle Pegase et de méthodes d'étude des dépendances. Ces variables clés serviront, dans le chapitre 7 « La dynamique du paysage suisse en fonction des variables clés », à analyser la dynamique du paysage de façon plus détaillée que dans le chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et sa dynamique », de façon ciblée sur les besoins du lièvre.

6.1 Méthodes

6.1.1 Base de données « Lièvre »

6.1.1.1 Variables

La base de données « Lièvre » comprend :

- Un « Indice d'abondance de lièvres » comme variable cible, calculé comme le nombre annuel moyen de lièvres tirés à la chasse entre 1980 et 1985 et par unité de surface communale,
- les 40 variables « Paysage » comme variables explicatives (variables présentées au chapitre 4).

Indice d'abondance de lièvres

L'indice d'abondance de lièvres a été calculé à partir des statistiques de la chasse affermée¹ comme le nombre annuel moyen de lièvres tirés à la chasse entre 1980 et 1985 par zone de chasse affermée, rapporté par unité de surface communale (SC). Bien que le territoire communal comprenne des zones qui ne sont pas utilisées par le lièvre, nous avons exprimé l'indice d'abondance de lièvres par rapport à la SC, afin d'inclure les facteurs provenant de ces zones, qui pourraient avoir une influence sur la zone agricole et sur les populations de lièvres, telles que les aires industrielles ou les surfaces de transports par exemple. Calculer cet indice comme le nombre de lièvres tirés par unité de SAU n'est, à première vue, pas plus avantageux que par unités de SC. En effet, l'habitat potentiel réel du lièvre n'est pas non plus la SAU, mais plus probablement une partie seulement de la SAU, additionnée des forêts, des zones incultes, des zones urbaines peu denses ou non construites. Les valeurs proviennent des statistiques fédérales de la chasse, OFEFP (www.wild.unizh.ch). Les statistiques de la chasse sont souvent utilisées comme mesure relative de l'état d'une population de lièvres, lorsqu'il s'agit d'une longue période et de grandes surfaces (Pfister et al., 2002), permettant de comparer d'état des populations à différentes époques ou différents endroits. Ces auteurs mentionnent tout de même que cette méthode comporte certaines imprécisions et limites (voir chapitre Etat des connaissances) : le résultat de la chasse est non seulement proportionnellement plus fructueux lorsque la population de lièvres est élevée que lorsqu'elle est faible, mais dépend aussi des restrictions imposées aux chasseurs. Selon l'Office national de la chasse (1995), les fluctuations annuelles des tableaux de chasse sont un reflet assez peu déformé de celles des populations de lièvre. Mankin & Warner (1999) utilisent les données de la chasse pour calculer un indice d'abondance relative d'individus, donnant le nombre de lapins tirés par chasseur et par jour. Schröpfer

¹ Zone de chasse affermée : Territoire loué par des chasseurs pendant plusieurs années, sur lequel ils sont les seuls, avec leurs invités, à pouvoir chasser. Cantons pratiquant la chasse par zones affermées : AG, BL, BS, LU, SG, SH, SO, TG, ZH. Traduction du terme allemand « Revier ». Les limites de ces territoires ne correspondent pas forcément à celles des communes. Par opposition avec la chasse avec permis, selon laquelle celui qui répond à certaines exigences peut obtenir un permis annuel, valable pour tout ou partie d'un canton. Cantons de chasse avec permis : AI, AR, BE, FR, GL, GR, JU, NE, NW, OW, SZ, TI, UR, VD, VS, ZG. Source : Site internet de l'Office Fédéral de la Statistique.

& Nyenhuis (1982) calcule une abondance relative, égale à la moyenne des tableaux de chasse sur 12 ans rapportée à 1'000 ha de surface chassée. Nyenhuis (1998) calcule un quotient, égal au nombre de lièvres tirés par année et par 1'000ha de surface de chasse. Schäfers (1996) calcule une densité de lièvres tirés par 100ha de surface agricole utile.

La méthode de comptages de lièvres développée par la Station ornithologique suisse de Sempach permet une estimation de la population plus représentative du moment que les statistiques de la chasse. Mais ces données ne conviennent pas pour notre recherche. En effet, les comptages ont débuté à la fin de notre période d'étude (1991), époque à laquelle les populations sont devenues beaucoup plus faibles qu'auparavant. De plus, les comptages ont été effectués sur 218 zones, qui sont des unités écologiques, délimitées par des barrières (routes, rails, rivières), des zones inaccessibles aux lièvres (zones urbaines) ou des forêts, alors que les communes qui constituent l'unité de nos bases de données regroupent un mélange de tous ces types d'utilisation du sol.

6.1.1.2 Sous-échantillon « Lièvre » et période d'étude

Nous avons choisi comme sous-échantillon « Lièvre » les communes pour lesquelles il existe des données de chasse par zones affermées sur la période 1980-1985. Cette période est celle pour laquelle les données de chasse sont les plus complètes et reflètent les populations effectives, compte tenu des limites de la méthode évoquées auparavant. En considérant les valeurs moyennes sur 6 ans, il est possible de réduire les effets des variations annuelles des performances des chasseurs, de l'annonce des tirs et d'autres facteurs indépendants du paysage (Mankin & Warner, 1999). Le nombre de communes qui se superposent à des zones de chasse affermées est assez important (125) pour permettre des analyses statistiques, alors qu'il ne l'est pas pour les décennies précédentes (68 communes en '70, aucune en '50 et '60). En '90, les données de la chasse disponibles sur les mêmes 125 communes sont faussées par le fait que la chasse est devenue extrêmement réglementée par l'introduction de la Loi sur la chasse et la protection des mammifères, en 1986, et que les populations effectives sont devenues très faibles.

Les limites de ces 125 communes et celles des zones affermées ne se superposent pas exactement. Nous avons calculé la densité de lièvres tirés sur la surface communale par pondération surfacique de la densité de lièvres tirés par zones affermées. Les densités calculées par commune se trouvent dans l'Annexe 6.1.

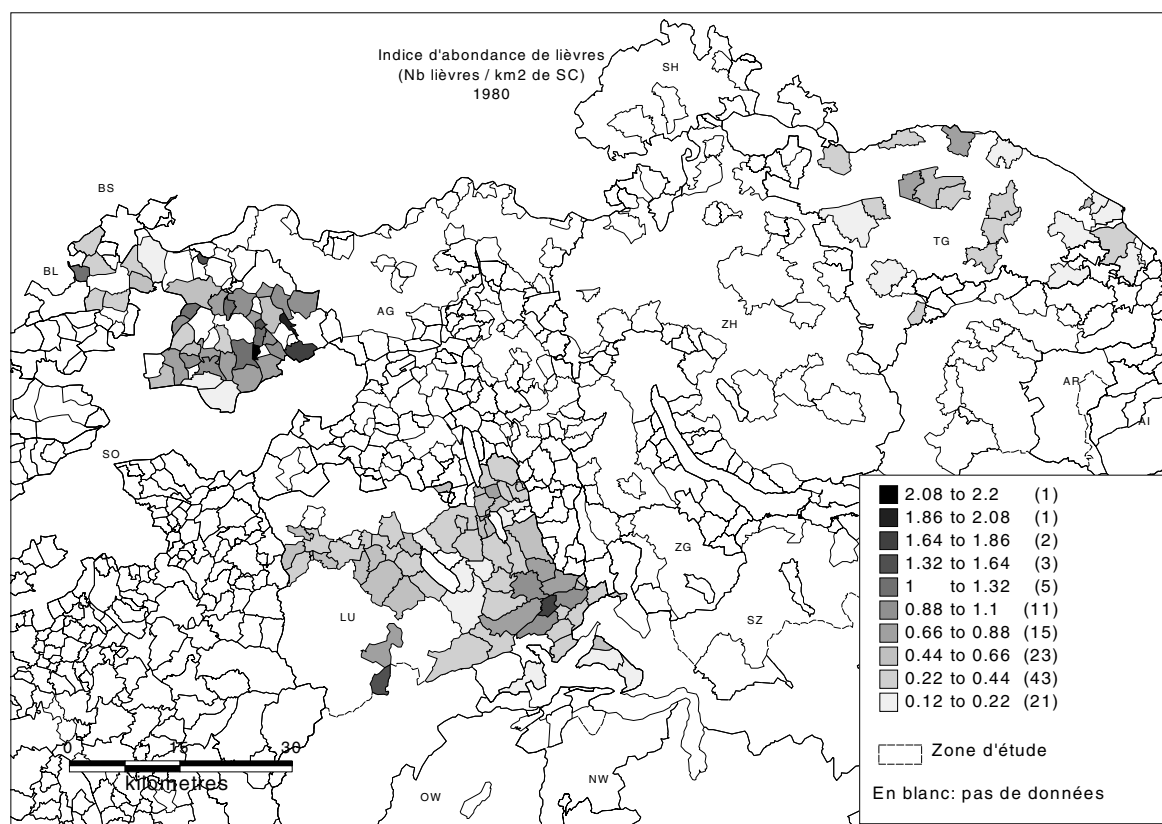
Le sous-échantillon « Lièvre » est constitué de 125 communes, 13% de l'échantillon « Paysage » en nombre de communes et en surface. Elles sont réparties sur trois cantons : LU, BL et TG (Tab.6.1 et Fig.6.1).

Dans ce chapitre, nous limiterons à la décennie '80 notre étude de la relation entre l'indice d'abondance de lièvres et les valeurs des variables « Paysage ».

Tab.6.1: Composition du sous-échantillon « Lièvre » : répartition des 125 communes par cantons (S = surface).

N° canton	Abréviation	Canton	Nombre de communes	Sous-Echantillon "lièvre"		
				S totale [km2]	S relative % à la surface de l'échantillon "Paysage" par canton	S relative % à la surface du canton
3	LU	Luzern	63	559.39	90%	39%
13	BL	Basel-Landschaft	41	272.72	69%	53%
20	TG	Thurgau	21	242.35	94%	28%
		Total	125	1'074.46	84%	38%

Fig.6.1 : Les 125 communes du sous-échantillon « Lièvre », réparties sur 3 cantons (LU, BL, TG), avec l'indice d'abondance de lièvres en [nb/km²], réparti en 10 classes équidistantes (de même intervalles). Légende : Bornes des classes avec entre parenthèses le nombre de communes.



6.1.2 Pegase

La méthode d'analyse Pegase², une procédure divisive hiérarchique multivariée, basée sur la théorie de l'information, a été développée dans le but de découvrir le modèle d'organisation écologique du paysage et de mesurer son niveau d'ordre écologique. Pour une description plus complète, le lecteur est invité à se reporter à l'Annexe 6.2 « Pegase ».

² Pegase : Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique, développé par M. Phipps, Département de Géographie, Université d'Ottawa, Ottawa, Canada.

Procédure

Cette méthode Pegase a été choisie pour son originalité, son formalisme mathématique simple, le fait qu'elle se base sur une théorie solide (la théorie de l'information) et finalement du fait que, comme elle n'utilise les variables que sous forme discrétisées, elle convient à l'analyse de base de données qui contiennent des descripteurs de type continu, catégoriel, nominal ou ordinal (Phipps, 1981). L'algorithme fonctionne selon une procédure de division de l'échantillon initial de communes (appelées unités) par étapes successives, illustrée par le dendrogramme de Fig.6.2 : A chaque palier et pour chaque sous-échantillon, Pegase détermine la variable divisive, parmi les variables « Paysage » (appelées variables explicatives ou variables indépendantes) qui, en divisant le sous-échantillon concerné, permet la plus grande diminution du désordre (appelée réduction d'entropie) du système, et mène à la plus grande explication de l'état de la variable cible. Le calcul de l'entropie du système est basé sur la Formule de Shannon:

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

avec p_j la probabilité que l'état de la variable cible de l'unité spatiale observée soit a_j , $j=(1, m)$, m étant le nombre d'états que peut prendre la variable cible. De façon analogue, la régression multiple sélectionne les variables explicatives selon leur capacité à minimiser le carré des erreurs. Avec Pegase, une variable peut être utilisée plusieurs fois comme variable divisive, à différents endroits de la procédure, comme B et D dans Fig.6.2a. Elle ne contribue à l'explication de la variable cible que pour une partie de l'échantillon, au contraire d'une régression multiple, dans laquelle les variables déterminées ont une action sur les valeurs de la variable cible de tout l'échantillon. Le résultat de la procédure est un nombre fini de sous-échantillons terminaux de communes (TSS³) présentant la même combinaison de variables descriptives du paysage (par exemple dans Fig.6.2a : TSS1 est une combinaison des variables A et B, dans leur état respectif A1 et B3). Connaissant la combinaison des variables explicatives d'une commune, l'indice d'abondance de lièvres (appelé variable cible ou variable dépendante), peut être déterminée avec une certaine probabilité, déterminées grâce à la matrice d'occurrence des communes par TSS et par classe de la variable cible (Fig.6.3). Ces combinaisons fonctionnent comme des règles dans des systèmes à base de connaissance, par exemple le modèle appelé C4.5 (Quinlan, 1987) qui utilise l'algorithme ID3 (Thompson & Thompson, 1986).

³ TSS : Terminal Sub Set : Sous-échantillon terminal

Fig.6.2 : a) Dendrogramme illustrant les trois premiers paliers de la procédure de divisive hiérarchique multivariée de Pegase. Pour des explications, se référer au texte. b) Diminution de l'entropie du système avec la formation de TSS, selon une courbe exponentielle négative. * Entropie résiduelle théorique.

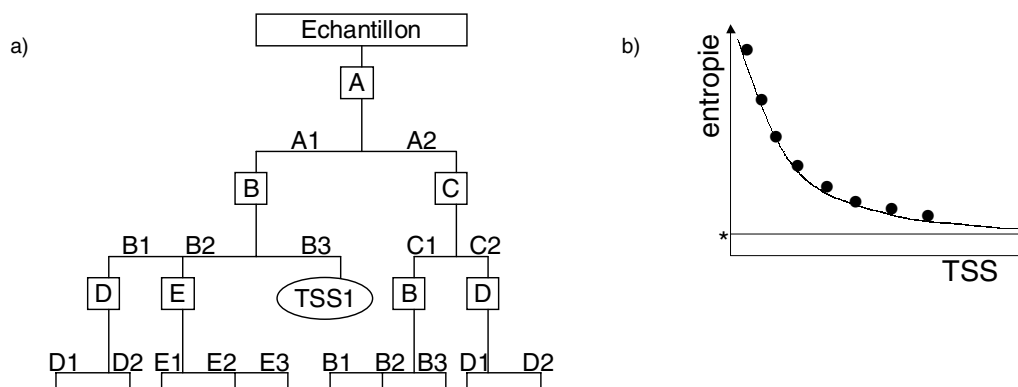


Fig.6.3 : Matrice d'occurrence des communes par TSS et par classe de la variable cible « Indice d'abondance de lièvres ». Dans cet exemple, 9 TSS sont créés et la variable cible est discrétisée en 2 classes équiprobables : $C_{IL1} =]0 ; 0.434]$ et $C_{IL2} =]0.434 ; 2.193]$ (unité : nb/km²).

TSS	C_{IL1}	C_{IL2}	TOT
1	0	1	1
2	20	42	62
3	0	2	2
4	0	1	1
5	8	1	9
6	19	0	19
7	5	2	7
8	0	5	5
9	11	8	19
TOT	63	62	125

Si TSS=2, alors: $p(C_{IL1})=20/62$
 et $p(C_{IL2})=42/62$

↑

A=A1 et B=B3

La procédure de division s'arrête lorsqu'une des trois règles d'arrêt est atteinte : (1) le nombre de communes dans un sous-échantillon est plus petit qu'un nombre minimum ; (2) l'entropie résiduelle (le désordre encore présent) est inférieure à une certaine valeur ; (3) aucune variable n'est sélectionnée, ce qui s'explique par un réel hasard ou un manque de variables pertinentes. Un tel sous-échantillon devient alors un TSS. Tout au long de la procédure, des TSS sont créés et l'entropie (désordre) du système total diminue, c'est-à-dire la relation entre les variables explicatives et la variable cible devient plus forte. Cette diminution d'entropie suit une courbe exponentielle négative admettant une asymptote horizontale (Fig.6.2b) dont la valeur à l'ordonnée est l'entropie résiduelle théorique du système. La diminution relative de l'entropie est appelée la redondance. Un bon modèle de Pegase mène à un nombre minimal de TSS et en même temps à une redondance théorique maximale.

Mankin & Warner (1999) utilisent un modèle similaire à Pegase pour effectuer une analyse spatiale associant le patron régional de changements de l'indice d'abondance relative du lapin avec les patrons du paysage.

Les critères de Pegase

Le modèle du paysage résultant de l'analyse par Pegase dépend fortement : 1) de la façon dont les variables ont été discrétisées avant d'être introduites dans le programme. Il dépend également de deux autres critères, également laissés au choix de l'utilisateur : 2) des conditions d'arrêt de la procédure de division ; 3) de l'ordre de priorité en cas d'ex æquo. Il est important de préciser que cet ordre de priorité n'influence absolument pas la combinaison des variables divisives, sauf dans les cas où deux valeurs du critère de sélection sont ex æquo ($\pm 2.5\%$). De manière générale, on remarque que ce cas est relativement rare, et que ce critère n'est pas utilisé dans chaque analyse par Pegase. En général, ce sont les variables les plus importantes pour le problème étudié, ainsi que les variables les plus robustes, qui sont placées en premier (communication personnelle de M.Phipps). Dans les applications existantes de Pegase, la variable cible est une variable d'état discontinue (par exemple des types de végétation, des types d'utilisation du sol, présence/absence d'un élément), et les variables explicatives, dans le cas où elles seraient continues, sont discrétisées de façon à ce que les classes formées aient une signification (écologique ou logique en fonction du problème étudié), ou, si ce n'est pas possible, de façon équiprobable. Cette dernière option garantit que l'entropie de la variable est à son maximum et que, en conséquence, sa capacité d'explication potentielle de la variable cible est à son plus haut niveau. Les conditions d'arrêt n'auraient pas une influence prépondérante (communication personnelle de M.Phipps).

Quelques essais effectués sur la base de données « Lièvre » présentés dans l'Annexe 6.3 nous conduisent à utiliser la méthode d'analyse Pegase avec les critères suivants :

- Discrétisation des variables : en deux classes équiprobables, plus la classe comprenant les valeurs nulles, le cas échéant.
- Condition d'arrêt : un nombre d'unités minimum par sous-échantillon à diviser égal à 8.
- Ordre de priorité des variables (ordre décroissant) : Zone urbaine/SC > SAU/SC > Bâtiment/SC > Route&rail/SAU > Route nationale/SAU > Voiture/SC > Main-d'œuvre/SAU > Maïs/to > to/SAU > Variables Urbanisation et surfaces construites > Variables Agriculture > Variables Climat > Variables Morphologie > Variables Géographie (voir Annexe 6.3 pour la définition exacte de ces groupes de variables).

Validation

La méthode d'analyse 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. Nous vérifierons tout de même que les sous-échantillons créés par Pegase soient significativement distincts les uns des autres.

Par contre, si le résultat de l'analyse devait être utilisé pour en faire un modèle de prédiction de l'état de la variable cible dans un nouveau contexte, une validation du modèle devrait être effectuée selon une des méthodes suivantes, en fonction des données à disposition :

- Créer un modèle sur un système et l'utiliser sur un autre système, ce qui implique d'avoir à disposition deux bases de données décrivant un certain nombre de communes,
- Découper la base de données en deux parties, la première servant à déterminer le modèle, la seconde servant à en vérifier le bon fonctionnement.
- Créer un modèle sur un système, générer des valeurs empiriques de la variable cible à l'aide d'une autre technique sur un autre système, puis tenter de retrouver ces mêmes valeurs à l'aide du premier modèle.

Les deux premières variantes ne sont pas réalisables dans notre étude pour cause de manque de données. En effet, la base de données « Lièvre » contient déjà toutes les communes (125) pour lesquelles il était possible de calculer un indice d'abondance de lièvres à partir des données de la chasse. De plus, il ne serait pas raisonnable d'appliquer le modèle Pegase à une moitié de la base de données « Lièvre » : 62 communes ne sont pas suffisantes pour permettre une bonne classification. En effet, Phipps (1994) recommande un jeu de données de l'ordre de 1'000 unités pour obtenir des résultats raisonnables. Finalement, ni la littérature existante sur le sujet, ni la relation entre le nombre de lièvres et les variables du paysage établie par Pfister et al. (2002) (voir paragraphe 6.3.2), ne conviennent pour calculer une densité de lièvres tirés à la chasse, à partir de nos variables explicatives.

6.1.3 Etude de la relation « Lièvre-Paysage »

6.1.3.1 Avec Pegase

Tout d'abord, nous analyserons la relation entre l'indice de lièvres et les variables « paysage » à l'aide de la méthode Pegase, dans les conditions décrites ci-dessus (6.1.2) pour mettre en évidence les variables clés du paysage pour le lièvre. Cette application de Pegase est effectuée à la limite du domaine de fonctionnement, à cause du faible nombre d'unités (125 communes). Cette analyse est présentée en détail dans l'annexe 6.3, et le résultat principal se trouve ci-dessous (6.2.2.1).

Ensuite, nous analyserons, par un test t de Student, la composition (moyenne, erreur standard de la moyenne) des deux sous-échantillons IL1 et IL2 correspondant aux classes C_{IL1} et C_{IL2} de la variable cible. Comme nous ne nous trouvons pas dans les conditions habituelles pour des statistiques inférentielles, le résultat de ce test est à interpréter avec prudence. En effet, ces tests d'hypothèses s'effectuent, en temps normal, sur des échantillons aléatoires d'une population, alors que notre sous-échantillon « Lièvre » de 125 communes est constitué de l'ensemble des communes pour lesquelles l'indice de lièvres est connu. Nous admettrons qu'il est possible de considérer pour ce test t de Student notre sous-échantillon de 125 communes ainsi que les sous-échantillons IL1 et IL2 comme des échantillons (non aléatoires et non représentatifs) de la population de 936 communes « Paysage » ou des 2'128 communes de la zone d'étude.

6.1.3.2 Par des méthodes d'étude des dépendances

L'analyse de la corrélation et l'analyse de la régression multiple linéaire, deux méthodes d'étude des dépendances, sont des outils simples et performants pour découvrir les liaisons entre les variables, que ce soit entre la variable cible « Indice d'abondance de lièvres » et les variables explicatives ou entre les couples de variables explicatives. L'analyse de corrélation indique le degré de linéarité entre les variables (le coefficient de corrélation r est une mesure de la relation linéaire entre chaque couple de variables (X, Y)), alors que l'analyse de régression multiple indique la nature de la liaison entre la variable cible et les variables explicatives (la variable cible est estimée par une fonction des variables explicatives).

Ces deux méthodes d'étude des dépendances sont présentées dans de nombreux ouvrages de statistiques, par exemple (Wonnacott & Wonnacott, 1972 ; Laforge, 1981). Nous mentionnons ici uniquement le but poursuivi par ces analyses dans ce travail. Elles ont été effectuées avec les logiciels Excel et Statistica.

Corrélations

Un coefficient, supérieur à une valeur limite au-dessus de laquelle on peut rejeter l'hypothèse de non-corrélation, indique que la corrélation est significative et n'est pas due au hasard. Mais, même si l'on a pu établir, par cette méthode, que deux variables évoluent ensemble et sont liées par une relation statistique, on ne peut en déduire nécessairement une relation de cause à effet : Il peut arriver que deux variables évoluent dans le même sens parce qu'elles sont toutes les deux influencées par une troisième variable exogène. Un degré de corrélation existe véritablement, mais il est absurde d'en déduire une relation de cause à effet.

Nous avons calculé la matrice de corrélations entre les couples des variables de la base de données « Lièvre », c'est-à-dire sur les valeurs de 125 communes en '80.

Le but est de :

- Découvrir quelles sont les variables de la base de données « Lièvre » corrélées avec l'indice d'abondance de lièvres.
- Découvrir quelles sont les variables « Paysage » de la base de données « Lièvre » corrélées entre elles avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.5 ($|r| > 0.5$), afin de ne garder qu'une des variables corrélées et permettre un meilleur fonctionnement de l'algorithme d'analyse par régression multiple linéaire.

Régression multiple linéaire

La variable cible est estimée par une fonction des variables explicatives X donnée par:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_i X_i + \dots + b_n X_n$$

avec \hat{Y} la valeur estimée de Y , n le nombre de variables explicatives ($1 \leq i \leq n$), et b_i ($0 \leq i \leq n$) les coefficients partiels de régression. Ces coefficients sont significatifs si leur probabilité critique p est inférieure au seuil de 5% ($p < 0,05$). Cette méthode d'analyse n'est exécutée de façon optimale qu'avec des variables explicatives pas ou peu corrélées (Laforge, 1981).

Nous avons effectué une régression multiple linéaire entre la variable cible « Indice d'abondance de lièvres » et les variables peu ou pas corrélées entre elles (coefficient de corrélation $|r|$ inférieur à 0,5) de la base de données « Lièvre », contenant les valeurs de 125 communes en '80.

Le but est de :

- Découvrir quelles sont parmi les variables « Paysage » pas ou peu corrélées ($|r| < 0,5$) de la base de données « Lièvre » celles qui contribueront à l'explication de la variabilité de l'indice d'abondance de lièvres.

6.2 Résultats

La base de données « Lièvre » est un extrait de la base de données « Paysage » et va nous permettre de déterminer les variables clé du paysage pour le lièvre, alors que la base de données « Paysage » nous a permis de mener une étude préliminaire de la dynamique du paysage entre '50 et '90. Les caractéristiques principales des variables étant déjà décrites au chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et de sa dynamique », nous ne reviendrons pas sur ce point.

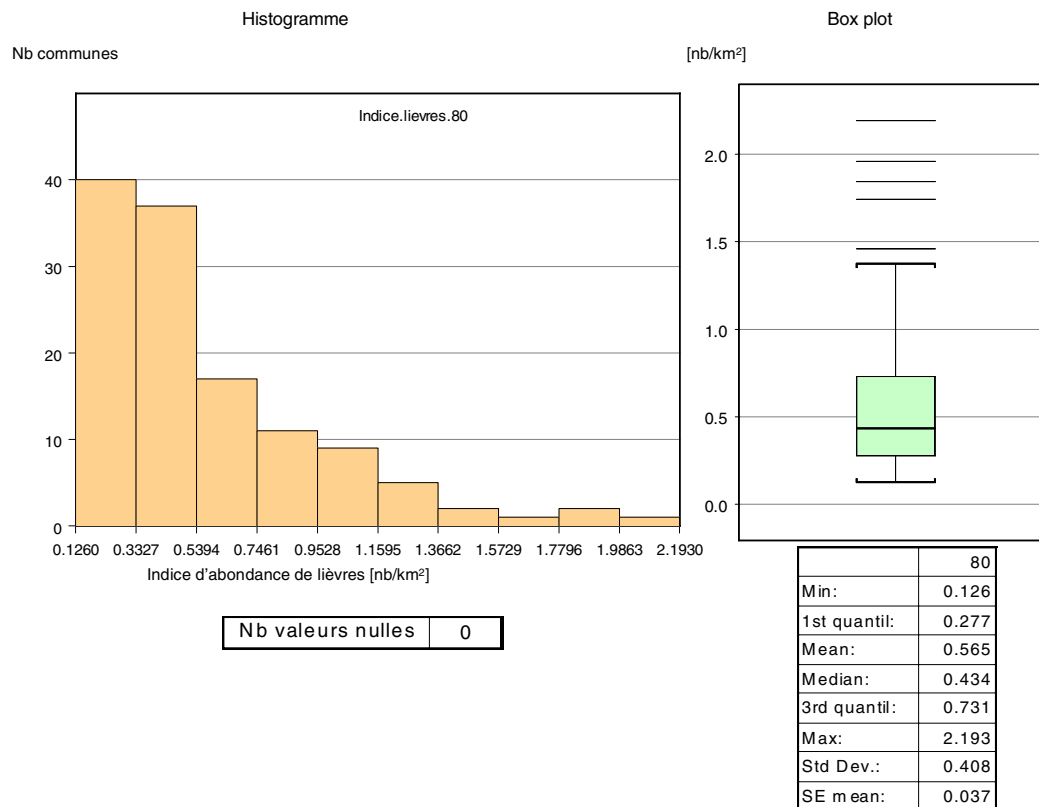
6.2.1 Caractéristiques principales de la variable « Indice d'abondance de lièvres »

La variable « Indice d'abondance de lièvres » est caractérisée par l'histogramme et le boxplot de Fig.6.4. Pour les aspects théoriques de ces outils d'analyse descriptive, voir chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et sa dynamique ».

La moyenne du nombre de lièvres tirés par unité de surface communale ($\pm SE$) est de 0.565 ± 0.037 pour '80. Rappelons qu'il s'agit, en réalité, des valeurs annuelles moyennes entre 1980 et 1985.

L'histogramme de Fig.6.4 montre une distribution décroissante, de type « I » (voir Fig.5.1, chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et sa dynamique »). Le boxplot montre des valeurs extrêmes vers les valeurs élevées, indiquant qu'un petit nombre de communes ont un « effectif » de lièvres tirés élevé, alors que la majorité des communes ne comptent qu'une nombre relativement faible de lièvres abattus. Cette information est confirmée par le fait que la médiane est inférieure à la moyenne : plus de la moitié des unités ont un nombre de lièvres tirés inférieur à la valeur moyenne. Aucune commune n'a un nombre nul de lièvres tirés, parce que ce sous-échantillon est constitué justement de toutes les communes sur lesquelles le nombre de lièvres abattus a été relevé dans les statistiques de la chasse.

Fig.6.4 : Histogramme, boxplot et valeurs caractéristiques de la variable « Indice d'abondance de lièvres ». N=125.



Les densités de lièvres tirés les plus importantes se trouvent dans l'est du canton de Bâle-campagne (BL) (Fig.6.1). On distingue aussi deux noyaux dans le canton de Lucerne (LU), alors que le canton de TG semble pauvre en lièvres tirés.

6.2.2 Etude de la relation entre « Indice d'abondance de lièvres » et les variables « Paysage »

6.2.2.1 Pegase

Le résultat présenté ici correspond à l'essai B de l'analyse par Pegase de l'annexe 6.3.

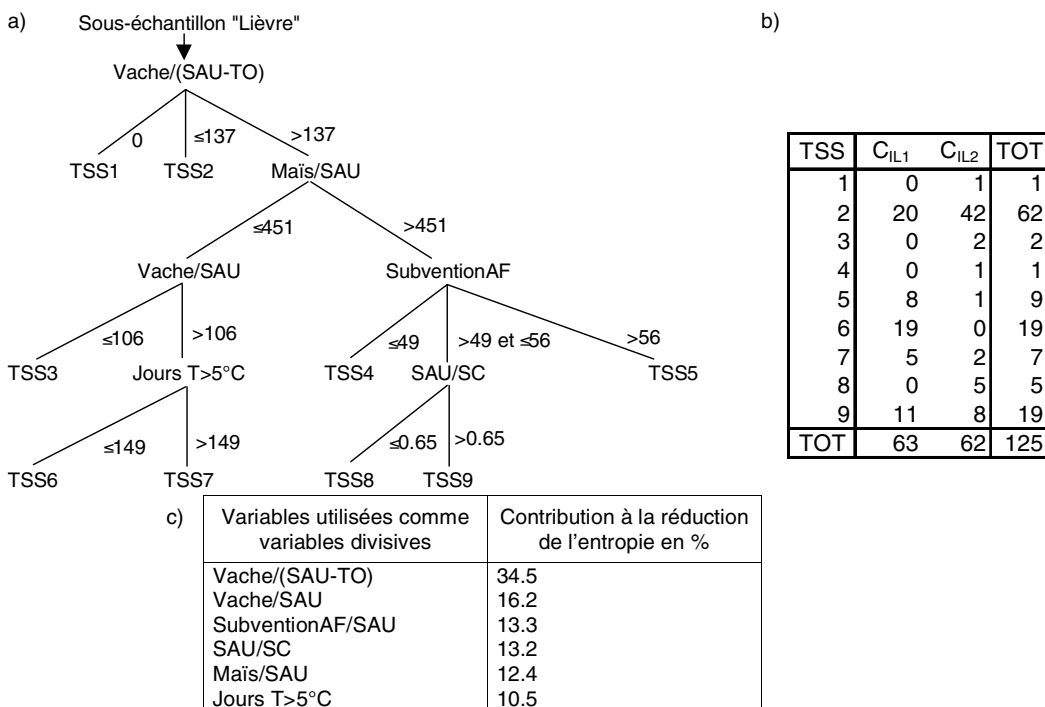
Réduction de l'entropie

La réduction de l'entropie observée (ou réduction du désordre) est de 31.6%. Les 68.4% restant sont dus soit à des variables inconnues, qui ne sont pas dans notre base de données, soit au hasard, soit à un mauvais fonctionnement du à la petite taille de notre sous-échantillon « Lièvre » (125 communes). Cette dernière hypothèse semble confirmée par l'instabilité constatée : en effet, Pegase aboutit à des résultats fort différents suite à des petites modifications des conditions de son fonctionnement (voir Annexe 6.3).

Les variables divisives sélectionnées

Pegase sélectionne 6 variables comme variables divisives (Fig.6.5) :

Fig.6.5 : Variables divisives utilisées par Pegase lorsque la variable cible est discrétisée en 2 classes : $C_{IL1} =]0 ; 0.434]$, $N_1 = 63$ et $C_{IL2} =]0.434 ; 2.193]$, $N_2 = 62$ (unité : nb/km²) : a) Dendrogramme de la division, avec les valeurs délimitant les classes des variables divisives ; b) Matrice d'occurrence des communes par TSS et par classe de la variable cible « Indice d'abondance de lièvres » ; c) les variables divisives et leur contribution à la réduction de l'entropie (réduction du désordre). (Essai B, extrait de Tab. A 6.6.3, Annexe 6.3).



Tout en étant conscients que nous travaillons aux limites du domaine de fonctionnement de cette méthode, nous retenons ces variables comme des variables clés du paysage pour le lièvre. Parmi elles, 4 sont des variables agricoles (« Vache/SAU-TO », « Vache/SAU », « SubventionAF/SAU » et « Maïs/SAU ») et participent ensemble pour 76.4% à la diminution de l'entropie du système, l'une décrit l'utilisation du sol (« SAU/SC ») avec 13.2%, et la dernière décrit le climat (« Jours T>5°C ») avec 10.5%. L'indice de lièvre ne peut pas être mis en relation simple avec chaque variable « Paysage », mais résulte de la combinaison des variables (Fig.6.5a). Ces combinaisons forment des règles complexes, dont l'interprétation nécessite que nous discutons déjà maintenant de la signification de ces combinaisons de variables clés, en anticipation de la discussion ci-après (6.3.3). Remarquons tout d'abord que les TSS1, TSS3 et TSS4 sont issus de règles extrêmement faibles, ne concernant qu'une ou deux communes. Elles sont d'emblée écartées de nos discussions.

(1) « Vache/(SAU-TO) » : traduit la présence du bétail. Sur les communes avec de faibles densités de vaches laitières par unité de SAU non-terre ouverte (« SAU-TO ») (TSS2), la probabilité que l'indice d'abondance de lièvres soit grand est plus élevée que la probabilité que l'indice de lièvres

soit petit : $p(C_{IL2} | TSS2)^4 = 42/62 = 0.68$; $p(C_{IL1} | TSS2) = 20/62 = 0.32$. Cette relation, de type simple, correspond aux conclusions de Frylestam (1976) et Pfister (1995).

- (2) « Maïs/SAU » : cette culture est typique d'une exploitation agricole intensive et traduit donc une source de dérangements, de mortalité directe (fauche des nichées de levrauts), d'empoisonnement par les produits phytosanitaires et de diminution de variété de nourriture (Pfister et al., 2002). Ce phénomène est traduit ici par la surface relative exploitée en maïs, une culture typique d'une exploitation agricole intensive. Sur les communes dont les valeurs relatives de vaches laitières et de maïs sont importantes, la probabilité que l'indice d'abondance de lièvres soit faible est de plus de 50% ($p(C_{IL1} | (TSS4+TSS5+TSS8+TSS9)) = 19/34 = 0.56$). On est ici dans la situation où l'exploitation agricole est intensive, autant par la production laitière que par les grandes cultures.
- (3) « Vache/SAU » : traduit la présence du bétail, mais de façon moins spécifique parce que mesurée relativement à la SAU, c'est-à-dire à une surface beaucoup plus importante que la variable « Vache/(SAU-TO) » au point (1) ci-dessus. D'ailleurs, la division du sous-échantillon à ce palier n'est que peu intéressante, car le TSS3 ne concerne que deux communes. Ceci n'implique pas que cette « Vache/SAU » n'est pas intéressante pour expliquer le système : cette variable participe à l'explication des TSS6 et TSS7, en combinaison avec « Vache/(SAU-TO) », « Maïs/SAU » et « Jours $T > 5^\circ\text{C}$ ».
- (4) « SubventionAF/SAU » : Ces subventions encouragent des pratiques agricoles intensives, en permettant des remaniements parcellaires et des aménagements tels que des chemins d'accès, des systèmes de drainage ou encore de nouveaux bâtiments agricoles. Nous constatons en effet que, sur les communes dont les valeurs relatives de vaches laitières et de maïs sont importantes, la probabilité que l'indice d'abondance de lièvres soit faible est élevée si les subventions AF sont importantes, donc dans la situation où l'exploitation agricole est intensive ($p(C_{IL1} | (TSS5)) = 8/9 = 0.89$), alors qu'elle est inférieure à 50% si les subventions AF sont moins importantes ($p(C_{IL1} | (TSS8+TSS9)) = 11/24 = 0.46$).
- (5) Lorsque les pratiques agricoles sont de type intensif, une commune avec une grande part de SAU dans la surface communale n'est pas favorable au lièvre : la Fig.6.5 montre que, sur les communes où les pratiques agricoles sont intensives (avec des valeurs relatives élevées de nombre de vaches laitières, de maïs et des valeurs relativement importantes de subventions AF), la probabilité que l'indice de lièvre soit élevé sur une commune avec une grande surface de SAU est inférieure à 50% ($p(C_{IL2} | TSS9) = 8/19 = 0.42$) ; au contraire, la probabilité que l'indice de lièvre soit élevé sur une commune avec une petite surface de SAU est de 100% ($p(C_{IL2} | TSS8) = 5/5 = 1$). Ce résultat est, dans un sens, contraire aux connaissances sur le lièvre. En effet, les grandes surfaces de champs ininterrompues devraient constituer un habitat potentiel très intéressant pour le lièvre (Pfister et al., 2002). Mais, du fait que la combinaison de variables ci-dessus suggère qu'une grande part de SAU n'est défavorable au lièvre que si les surfaces sont cultivées de façon

⁴ $p(C_{IL2} | TSS2) = 42/62 = 0.68$ est à lire de la façon suivante : La probabilité que l'indice de lièvre sur une commune soit compris dans la classe C_{IL2} , sachant que cette commune fait partie du sous-échantillon terminal TSS2, est de 68%.

intensive, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une petite surface cultivée de façon extensive est plus intéressante pour le lièvre qu'une grande étendue de cultures intensives.

- (6) Lorsque l'exploitation est orientée vers la production laitière et non pas vers les grandes cultures (densité de vaches laitières important et part de maïs dans la SAU peu importante), la probabilité que l'indice de lièvres soit petit lorsque le climat est peu favorable (Nombre de jours avec $T5^{\circ}\text{C}$ faible) est de 100% ($p(C_{IL2}|TSS6)=19/19=1$). Cette dernière relation rejoint totalement les connaissances des experts (Pfister et al., 2002) ; Fraguilione, 1975). Par contre, lorsque le climat est clément, cette probabilité est également de plus de 50% ($p(C_{IL1}|TSS7)=5/7=0.71$), contradiction qui s'explique éventuellement par le fait que des hivers doux ne sont pas non plus favorables au lièvre, parce qu'ils permettent la prolifération de maladies, tel la coccidiose (Eiberle & Matter, 1982).

Analyse de la composition des sous-échantillons IL1 et IL2

La discrétisation de la variable « Indice d'abondance de lièvres » en deux classes presque équiprobables ($C_{IL1}=[0; 0.434]$ et $C_{IL2}]=[0.434; 2.193]$) mène à deux sous-échantillons : IL1 avec 63 communes et IL2 avec 62 communes. Les moyennes sur ces deux sous-échantillons des valeurs des variables utilisées comme variables divisives par Pegase sont significativement différentes pour 4 d'entre elles, selon un test t de Student, au seuil de 1% ($p<0.01$) (Tab.6.2) : pour « SubventionAF/SAU », « Vache/SAU », « Vache/SAU-TO », les moyennes sont significativement supérieures sur le sous-échantillon constitué des communes avec un indice de lièvres faible (IL1) que sur les communes avec un indice de lièvres important (IL2). Pour « Jours $T>5^{\circ}\text{C}$ », la moyenne sur IL1 est significativement inférieure au seuil de 1% que la moyenne sur IL2. Les deux dernières variables, « SAU/SC » et « Maïs/SAU », ne sont pas réparties de façon significativement différente, ceci pouvant éventuellement expliquer le résultat peu clair apporté par « SAU/SC » dans le dendrogramme ci-dessous. Ces résultats doivent être considérés avec prudence, du fait que les sous-échantillons IL1 et IL2 sont aléatoires et non représentatifs au sens statistique (voir 6.1.3.1)

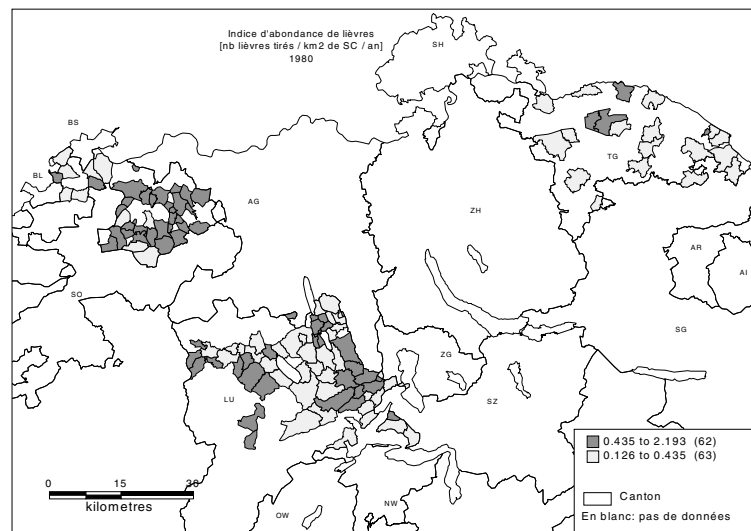
Tab.6.2: Moyennes (\pm Ecart-type) des valeurs des variables retenues par Pegase comme variables divisives sur les deux sous-échantillons formés par les communes avec un indice de lièvres faible (IL1 : $N_1=63$) et les communes avec un indice de lièvres important (IL2 : $N_2=62$). La comparaison des moyennes est effectuée à l'aide du test t de Student (nombre degré liberté =123, valeur critique : t-value = 2.36 pour $p=0.01$). Interprétation de ce test : voir texte.

	Sous-échantillon IL1 $C_{IL1}=[0; 0.434]$ $N_1=63$		Sous-échantillon IL2 $C_{IL2}]=[0.434;2.193]$ $N_2=62$		t-value	p
	moyenne	ecart type	moyenne	ecart type		
Mais/SAU	453.889	306.254	479.211	301.033	-0.466	0.642
SAU/SC	0.631	0.189	0.593	0.218	1.052	0.295
SubventionAF/SAU	57.476	5.960	52.936	4.885	4.654	<0.001
Vache/SAU	109.717	42.548	86.864	32.619	3.366	0.001
Vache/(SAU-TO)	143.922	45.522	113.905	41.862	3.836	<0.001
Jours $T>5^{\circ}\text{C}$	158.535	18.267	175.506	24.440	-4.402	<0.001

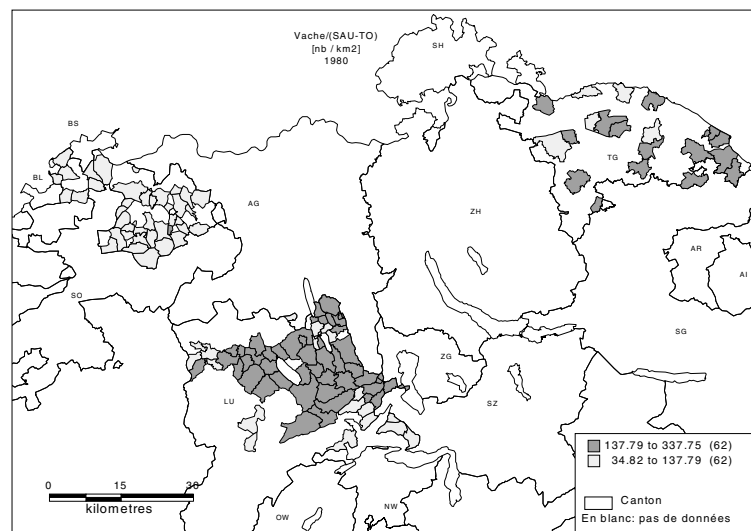
La répartition spatiale de ces sous-échantillons est illustrée dans la Fig.6.6. Les communes avec un indice de lièvres important se regroupent dans la partie est du canton de BL, dans les parties ouest et est du canton de LU, et dans une petite partie centrale du canton de TG. Dans cette figure, nous montrons également les répartitions spatiales des valeurs des variables « Vache/(SAU-TO) », « Vache/SAU », « SubventionAF/SAU et « JoursT>5°C ». Ces répartitions spatiales ne semblent visuellement pas à mettre en relation avec celle de l'indice de lièvre. Pourtant, nous verrons, par la suite, que ces 4 variables sont corrélées avec l'indice d'abondance de lièvres.

Fig.6.6 : Distribution spatiale des communes selon : a) l'état de l'Indice d'abondance de lièvres ; et selon l'état des variables dont les valeurs moyennes sur les deux sous-échantillons IL1 et IL2 sont significativement différentes (Tab.6.2) : b) « Vache/(SAU-TO) » ; c) « Vache/SAU » ; d) « SubventionAF/SAU** e) « JoursT>5°C ». **Variable cantonale. Légende : Bornes des classes avec entre parenthèses le nombre de communes. (Fonds de carte : OFS GEOSTAT / S+T)

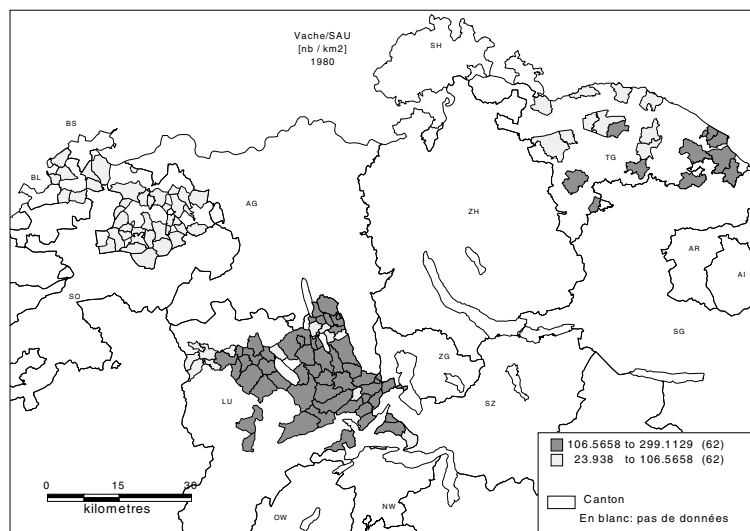
a)



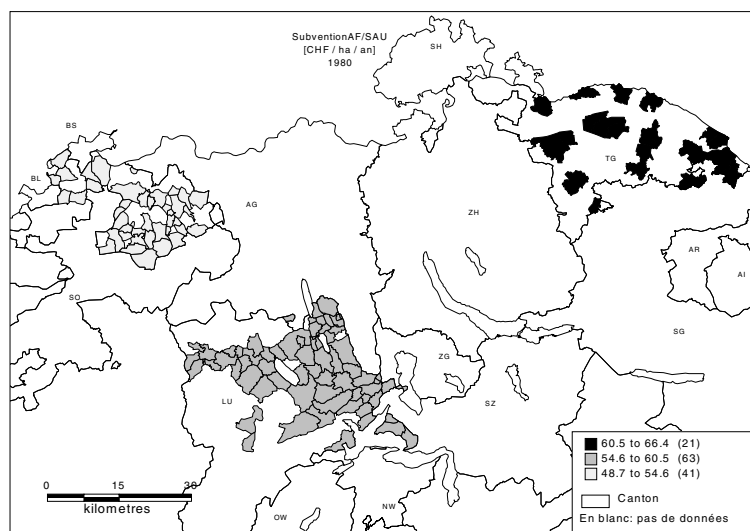
b)



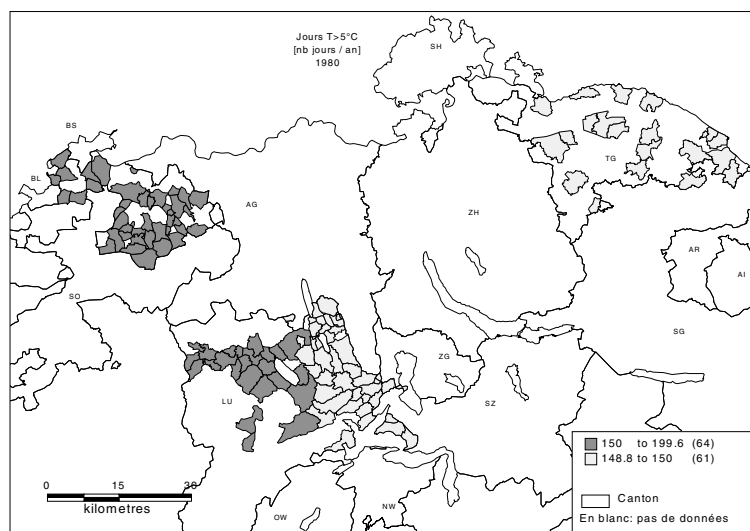
c)



d)



e)



Les critères de Pegase

Les essais d'application de Pegase selon différentes valeurs des trois critères (D, R et O) ne peuvent être considérés comme une analyse de sensibilité car ils souffrent de la petite taille du jeu de données (125 communes). Nous en retirons tout de même les informations suivantes, sur la base de la comparaison des résultats de nos 8 applications (Annexe 6.3) :

- La discrétisation des variables continues semble être une étape préliminaire à Pegase dont l'influence sur le résultat est primordiale. Une discrétisation selon deux classes équiprobables semble permettre le meilleur résultat.
- Le choix des conditions d'arrêt de Pegase est important parce qu'il permet de simplifier le résultat, et de ne pas se perdre dans des détails de peu d'importance. Un minimum de 8 unités semble adéquat comme condition d'arrêt de la procédure de division.
- L'ordre de priorité, utilisé pour départager deux variables qui permettraient la même réduction d'entropie, influence le résultat dans une moindre mesure. L'ordre adéquat, ici, semble être celui où les variables concernant directement le lièvre sont placées en premier (par ordre décroissant : Zone urbaine, SAU, Bâtiment, Route&rail, Route nationale, Voiture, Main-d'œuvre, Maïs, Terre ouverte), puis les variables restantes.

6.2.2.2 Matrice des corrélations

Les corrélations répertoriées dans la matrice de corrélation des couples de variables « Paysage » sur les 125 communes de la base de données « Lièvre » (Annexe 6.4) vérifient, pour la plupart, notre compréhension intuitive des relations entre les variables. Le but est moins ici de discuter des relations qu'on peut s'attendre à trouver entre les variables, que de découvrir les relations entre ces variables « Paysage » et la variable cible « Indice d'abondance de lièvres ».

Tab.6.3 : Coefficient de corrélation r entre la variable « Indice d'abondance de lièvres » et les variables « Paysage ». Ne sont indiquées que les corrélations significatives (Test de signification: Valeur minimum en dessus de laquelle on peut rejeter l'hypothèse de non-corrélation, pour $N=125$, degré de liberté=123: $r=0.23$ pour $\alpha=0.01$). Les variables dans la zone grise sont laissées de côté (voir texte). Les variables sont regroupées selon 6 types (le type « Urbanisation » n'est pas représenté ici) (voir Chapitre 4 « Base de données Paysage », Tab.4.3). Extrait de la matrice de corrélation des 40 variables de l'Annexe 6.4.

Variables "Paysage"			Coefficient de corrélation r avec la variable "Indice d'abondance de lièvres"
<u>Utilisation du sol:</u>	Foret/SC	[ares/ha]	+0.28
<u>Pratiques agricoles:</u>	Main d'oeuvre/SAU	[nb/ha]	-0.39
	SubventionAF/SAU	[CHF/ha/an]	-0.44
	TailleParcelle	[ares]	-0.25
	Vache/(SAU-TO)	[nb/km ²]	-0.39
<u>Climat:</u>	JoursT>5	[nb/an]	+0.47
<u>Morphologie:</u>	Pentelnf17/SC	[ha/ha]	-0.29
<u>Géographie:</u>	Position	[km]	-0.27
Variables laissées de côté :	Main d'oeuvre/SC	[nb/ha]	-0.26
	Vache/SC	[nb/km ²]	-0.31
	Vache/SAU	[nb/km ²]	-0.38

Il apparaît que 11 variables sont significativement corrélées avec l'indice d'abondance de lièvres (Tab.6.3). Les deux variables « Main-d'œuvre/SAU » et « Vache/(SAU-TO) », corrélées avec des coefficients plus élevés que « Main-d'œuvre/SC », « Vache/SC » et « Vache/SAU » à l'indice de lièvres, sont adéquates pour décrire une possible influence sur le lièvre et nous permettent de laisser de côté les 3 autres. Il reste donc 8 variables, dont 4 sont des variables de type agricole (« Main-d'œuvre/SAU », « Subventions AF/SAU », « Taille parcelle », « Vache/(SAU-TO) »), une est de type utilisation du sol (« Forêt »), une de type morphologique (« Pente<17% »), une de type géographique (« Position ») et la dernière de type climatique (« JoursT>5°C »).

Il ressort de Tab.6.3 des relations linéaires que nous interprétons de la façon suivante :

- Une commune avec une densité de main-d'œuvre peu importante, des parcelles de tailles moyennes réduites, dont la part de surface avec une faible pente est peu importante, et qui ne reçoit que peu de subventions AF, aura un indice de lièvre probablement relativement important. On peut en conclure que cet animal recherche probablement les surfaces agricoles cultivées de façon peu intensive (travail dans les champs peu fréquents, aménagements peu importants, parcelles de petite taille, surfaces pentues, peu propices aux cultures mécanisées).
- Une commune qui possède de grandes surfaces de forêts aura un indice de lièvre relativement important. La forêt constitue donc probablement un refuge pour lui.
- Une commune avec une faible densité de vaches par SAU non terre ouverte, aura un indice de lièvre relativement important. On peut tirer deux hypothèses de ce constat : soit que le lièvre évite les pâturages lorsque le bétail est présent, soit que le bétail est un indicateur d'un type d'exploitation agricole peu apprécié du lièvre, sans qu'on n'en connaisse la raison exacte.
- Une commune sur laquelle on compte annuellement, en moyenne entre 1960 et 1990, un nombre important de jours avec une température moyenne supérieure à 5°C, aura un indice de lièvre relativement important. On en conclut que le lièvre est probablement sensible au climat et préfère les zones pas très pluvieuses et avec des températures douces.
- Une commune dont le centroïde est proche de Genève, aura un indice de lièvre relativement important.

6.2.2.3 Régression multiple entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables Paysage

Les variables « Paysage » utilisées pour la régression multiple sont celles qui montrent peu ou pas de corrélations entre elles (coefficients de corrélation en général inférieurs à 0.5 ($|r|<0.5$)). Elles figurent dans le tableau 6.4, un extrait de la matrice de corrélations en Annexe 6.4.

Cette combinaison de variables n'est pas l'unique possibilité pour obtenir un jeu de variables peu ou pas corrélées. Nous avons retenu, dans la mesure du possible, une variable appartenant à chaque groupe de variables représentatives de phénomènes proches, par exemple « AgglAppartenance » pour « AgglTaille », « Batiment », « Population » et « Zone urbaine », ou encore « Lait », dont les valeurs sont cantonales, pour « Pluie10 » et « Position ». Les variables « RouteNationale/SC » et

« RouteNationale/SAU » ont également été exclues, à cause de leur répartition presque bi-modale opposant les communes avec des valeurs nulles aux communes avec des valeurs non nulles.

Tab.6.4: Matrice de corrélation des 11 variables dont les coefficients de corrélation sont peu élevés, en général inférieurs à 0.5 ($|r| < 0.5$) et de l'indice de lièvres (extrait de l'Annexe 6.4). Test de signification: Valeur minimale au-dessus de laquelle on peut rejeter l'hypothèse de non-corrélation (pour $N=125$, nombre de degré de liberté = 123): $r=0.23$ pour $\alpha=0.01$.

	1	2	7	9	22	24	26	31	33	37	40	42	
Indice lievres	1	1.00	-	-	-0.39	-0.25	-	-	-	-0.29	-	0.47	
AgglAppartenance	2	-	1.00	-	-0.36	-	0.25	-	-	0.55	-	0.27	
Lait	7	-	-	1.00	-0.42	-0.41	0.28	-	0.34	-	-	-0.45	0.38
MainDoeuvre/SAU	9	-0.39	-0.36	-0.42	1.00	0.30	-	-	-	-0.30	0.39	0.41	-0.73
TailleParcelle	22	-0.25	-	-0.41	0.30	1.00	-0.25	-	-0.24	-0.23	-	0.30	-0.38
TerreOuverte/SAU	24	-	0.25	0.28	-	-0.25	1.00	-	-	-	0.46	-	-
Tracteur/SAU	26	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-
Verger/SAU	31	-	-	0.34	-	-0.24	-	-	1.00	-	0.32	-	-
Voiture/SAU	33	-	0.55	-	-0.30	-0.23	-	-	-	1.00	-	-	-
Pentelnf17	37	-0.29	-	-	0.39	-	0.46	-	0.32	-	1.00	0.45	-0.52
SolDefavorable	40	-	-	-0.45	0.41	0.30	-	-	-	-	0.45	1.00	-0.37
JoursT>5	42	0.47	0.27	0.38	-0.73	-0.38	-	-	-	-	-0.52	-0.37	1.00

Cette façon d'épurer la base de données permet de garantir un meilleur fonctionnement de l'algorithme de régression, mais ne permet pas de garantir une véritable « indépendance » des variables, limite de la méthode dont il faut tenir compte lors de l'interprétation de ces résultats.

La régression a été effectuée en trois étapes (les résultats détaillés se trouvent dans l'Annexe 6.5) :

Tout d'abord, la régression qui explique la plus grande part de la variance totale de l'indice d'abondance de lièvres est celle qui, calculée selon le mode « Stepwise Standard », sélectionne l'ensemble des variables (A). Elle aboutit à un R^2 -multiple de 0.2816 et est significative au seuil de 1% ($p=0.00003$). Parmi les 12 variables, seule « JoursT>5°C » est significative au seuil de 5%, avec un coefficient de 0.008685.

Comme deuxième étape, la régression selon le mode « Stepwise Forward » (B), qui aboutit à un modèle quasiment aussi performant au niveau de la part de la variance expliquée (R^2 -multiple de 0.2786), mais surtout à un gain au niveau de la signification et à une réduction du nombre de variables sélectionnées: Avec un $p < 0.00001$, la régression est fortement significative au seuil de 1% ; Seules 4 variables sont sélectionnées, parmi lesquelles deux sont significatives au seuil de 5%: « JoursT>5°C » et « Voiture/SAU ». La relation s'exprime alors par :

$$(B) \text{ « Indice d'abondance de lièvres = } 0.008956 * (\text{JoursT} > 5^\circ\text{C}) - 0.000125 * (\text{Voiture/SAU}) - 0.000389 * (\text{Taille parcelle}) - 0.000271 * (\text{Lait}) + 0.497099 \text{ »}$$

Finalement, le modèle selon le mode « Stepwise Forward » (C), affiné par augmentation de la valeur limite de F d'inclusion des variables de 1, comme elle était pour la variante (B) à 2. Cette régression aboutit à un modèle moins performant au niveau de la part de la variance expliquée (R^2 -multiple de 0.25360), à une relation à nouveau fortement significative au seuil de 1% ($p < 0.00001$), et à une

réduction du nombre de variables sélectionnées : Seules les deux variables de (B) sont sélectionnées, toutes deux significatives au seuil de 5%.

La relation s'exprime cette fois par :

$$(C) \text{ « Indice d'abondance de lièvres} = 0.009074 * (\text{JoursT}>5^{\circ}\text{C}) - 0.000117 * (\text{Voiture}/\text{SAU}) - 0.911163 \text{ »}$$

Selon ce dernier modèle (C), une commune sur laquelle on compte annuellement en moyenne entre 1960 et 1990, un jour avec une température moyenne supérieure à 5°C de plus que sur une autre, aura un indice de lièvre de 0.009 plus élevé ; une commune sur laquelle on compte un nombre de voitures supérieur d'une unité par ha de SAU par rapport à une autre, aura un indice de lièvre de 0.0001 plus faible.

Les deux variables retenues par le modèle (C) sont fortement corrélées avec d'autres variables « Paysage », comme montré dans le Tab.6.5 (informations extraites de la matrice de corrélation en Annexe 6.4).

Tab.6.5 : Variables fortement corrélées ($r \geq 0,5$), de façon simple, à l'une des deux variables sélectionnées par régression multiple (information extraites de la matrice de corrélation en Annexe 6.4). + : corrélation positive ; - : corrélation négative. Les variables sont regroupées selon les types présentés au chapitre « Base de données Paysage », Tab.4.3).

Les 2 variables sélectionnées par régression multiple	Voiture/SAU	JoursT>5°C
Les variables « Paysage » avec lesquelles elles sont fortement corrélées ($r \geq 0,5$)	<u>Utilisation du sol « urbain » :</u> + Route&rail/SC + Route&rail/SAU + Zone urbaine/SC <u>Urbanisation :</u> + Agglomération appartenance + Agglomération taille + Batiment/SC + Population + Population/SAU + Voiture/SC	<u>Utilisation du sol « non urbain » :</u> + Forêt/SC <u>Pratiques agricoles :</u> - Maind'oeuvre/SC - Maind'oeuvre/SAU - Subvention AF/SC - Vache/SC - Vache/SAU - Vache/(SAU-to) <u>Climat :</u> - Pluie10 <u>Morphologie :</u> - Pentelnf17%

Cette observation nous permet d'interpréter le résultat de cette régression multiple de façon plus large, en étendant la signification des deux variables aux groupes de variables auxquelles elles sont corrélées. L'indice d'abondance de lièvres devient alors fonction :

- de l'urbanisation et de l'utilisation du sol qui en découle, traduite par la variable « Voiture/SAU »,
- des pratiques agricoles (y compris l'utilisation du sol en forêt), elles-mêmes influencées par les conditions climatiques et morphologiques, traduites par la variable « JoursT>5°C ».

6.3 Discussion

6.3.1 La variable « Indice d'abondance de lièvres »

Les valeurs d'indices d'abondance de lièvres que nous avons calculées sont comprises entre 0.126 et 2.193 lièvres tirés annuellement, en moyenne, durant les années 1980 à 1985, par km² de surface communale totale (SC). Exprimées par rapport à la SAU, elles sont comprises entre 0.270 et 11.835 lièvres tirés par km² de SAU.

Ces dernières valeurs ressemblent tout à fait aux valeurs calculées par Schäfers (1996) en Allemagne, qui vont de 11 lièvres tirés annuellement par km² de surface agricole utile dans les années '60 à 5 dans les années '90. Nyenhuis (1998) calcule une densité de lièvres tirés par km² de surface chassée par « Landkreis » et « kreisfreien Städten » (districts) en Allemagne : de moins de 1 à 18, selon le district et l'année, durant la période 1989 à 1996. Pielowski (1996) parle de 10 à 40 individus par km² de surface agricole, en Pologne, entre les années 1966 et 1989. Schröpfer & Nyenhuis (1982) n'indiquent pas explicitement les valeurs calculées d'abondance relative de lièvres.

Nos valeurs d'indice d'abondance de lièvres rapportées à la SC sont bien inférieures. Ceci s'explique tout d'abord par le simple fait que la surface communale totale est plus grande que la SAU, et ensuite parce que la SC inclut également les surfaces inaccessibles aux lièvres, telles que les surfaces construites, les lacs et les rivières, sur lesquelles aucun lièvre ne sera tiré. Ce constat nous amène à émettre des réserves concernant notre choix d'avoir calculé l'indice de lièvres comme le nombre de lièvres tirés par unité de SC. Mais nous voulons rappeler que ce choix était dicté par différentes motivations :

- Tout d'abord, calculer cet indice comme le nombre de lièvres tirés par unité de SAU n'est à première vue pas plus avantageux que par unités de SC. En effet, l'habitat potentiel réel du lièvre n'est pas non plus la SAU, mais plus probablement une partie seulement de la SAU, additionnée des forêts, des zones incultes, des zones urbaines peu denses ou non construites. Or, notre base de données « Paysage » n'est pas suffisante pour déterminer les surfaces correspondant à l'habitat potentiel réel du lièvre. Il serait nécessaire de connaître la part de la SAU inaccessible aux lièvres (par exemple les surfaces de cultures sous plastiques ou les pépinières clôturées), les surfaces incultes, les surfaces d'espaces verts et lieux de détente (par exemple les terrains de golf), les cours et surfaces entre les bâtiments agricoles recensées comme zones urbaines.
- Finalement, calculer cet indice comme le nombre de lièvres tirés par unité de SC présente l'avantage de permettre de tenir compte de l'influence des zones où le lièvre ne s'aventure pas ou peu, en particulier l'influence sur le voisinage des zones urbaines et des surfaces de transports. En effet, une zone urbaine occupée par des installations industrielles engendre des nuisances sonores sur les alentours et un trafic important.

Les valeurs d'indice d'abondance de lièvres que nous avons calculées ne sont pas comparables aux densités de lièvres calculées par Pfister et al. (2002) (0 à 22.2 individus par km²) pour trois raisons :

- Pfister et al. (2002) utilisent différentes sources de données, dont les nombres de lièvres aperçus vivants lors de campagnes de comptages ponctuels, alors que l'indice d'abondance de lièvres est calculé sur la base du nombre de lièvres tirés annuellement à la chasse.
- Le nombre de lièvres aperçus vivants est rapporté à la surface des zones de comptages, qui sont des unités écologiques favorables au lièvre, alors que nous avons rapporté le nombre de lièvres tirés à la surface de la commune, qui inclut également les surfaces inaccessibles pour le lièvre, comme les zones urbaines et les routes.
- Les comptages de lièvres ont eu lieu entre 1991 et 2000, alors que les valeurs de la chasse, sur lesquelles nous nous sommes basés, sont des moyennes sur la période 1980 à 1985.

6.3.2 Méthodes d'analyses

Le Tableau 6.6 rassemble les 16 variables clés pour le lièvre identifiées par les analyses menées ci-dessus, ainsi que par la lecture de Pfister et al (2001) :

Tab.6.6: Variables clés pour le lièvre, sélectionnées par les trois méthodes d'analyse de la base de données « Lièvre » et de la littérature, avec entre parenthèses le signe de la relation entre chaque variable et le lièvre (à l'exception de Pegase, où la relation n'est pas simple, mais résulte de la combinaison des variables, voir Fig.6.5.a). Au total, ce sont 16 variables distinctes. Les variables sont regroupées selon 6 types (voir Chapitre « Base de données Paysage », Tab.4.3).

Méthode :	(A) Matrice de corrélations '80	(B) Régression multiple linéaire '80	(C) Pegase '80	(D) Littérature : (Pfister et al., 2002) 1990-2000
Variables sélectionnées, classées par type :				
<u>Utilisation du sol :</u>	Forêt/SC (+)		SAU/SC	SAU/SC (+)
<u>Pratiques agricoles :</u>	Maind'œuvre/SC ⁵ (-) Maind'œuvre/SAU (-) SubventionsAF/SAU (-) TailleParcelle (-) Vache/SC ⁵ (-) Vache/SAU ⁵ (-) Vache/(SAU-TO) (-)		Maïs/SAU SubventionAF/SAU Vache/SAU ⁵ Vache/(SAU-TO)	Sol défavorable/SC (-) Tracteur/SAU (-)
<u>Urbanisation :</u>		Voiture/SAU (-)		Route&rail/SC (-)
<u>Climat :</u>	JoursT>5°C (+)	JoursT>5°C (+)	JoursT>5°C	Pluie10 (-)
<u>Morphologie :</u>	PenteInf17% (-)			Relief (-)
<u>Géographie :</u>	Position (-)			

Parmi les variables clés, 5 ont été sélectionnées par plusieurs des méthodes en parallèle (« SAU/SC », « SubventionAF/SAU », « Vache/SAU⁵ », « Vache/(SAU-TO) » et « JoursT>5°C »). Les autres variables clés, sélectionnées par chacune des 4 méthodes, sont différentes car ces méthodes sont complémentaires et ne poursuivent pas le même but :

- A. Matrice de corrélation : Les variables retenues sont celles dont le coefficient de corrélation est significatif ($|r| > 0.23$). La matrice de corrélation, en répertoriant les corrélations simples, permet de déterminer le degré de linéarité entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables « Paysage » ainsi que d'épurer la base de données pour permettre une meilleure analyse par régression multiple entre l'indice de lièvres et les variables « Paysage ».
- B. Régression multiple linéaire : Les variables retenues sont celles significatives au seuil de 5% ($p < 0.05$). La régression multiple indique la nature de la liaison entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables « Paysage » et pourrait constituer un modèle prédictif de la densité de lièvres tirés à la chasse.
- C. Pegase : Les variables retenues sont les variables divisives qui contribuent à la réduction de l'entropie. Pegase permet d'identifier les conditions favorables et défavorables au lièvre, résultant des combinaisons des variables « Paysage » que le modèle a utilisées comme variables divisives, ainsi que de regrouper les communes qui présentent ces conditions.
- D. Littérature (Pfister et al., 2002) : Les variables retenues sont les variables de la base de données « Paysage » qui correspondent, le mieux, à une partie des variables étudiées par la Station ornithologique suisse de Sempach. Pfister et al. (2002) présentent une analyse par régression multiple en plusieurs étapes entre les populations de lièvres et les éléments paysagers des zones de comptages de lièvres (voir chapitre 2 « Etat des connaissances ») : nous identifions les variables « SAU/SC » (proche de leur variable donnant la surface continue de champs), « Relief » (égale à leur variable donnant le relief), « Route&rail/SC » (égale à leur variables donnant la densité du réseau routier), « Sol défavorable » (égale à leur variable donnant l'humidité des sols), « Pluie10 » (proche de leur variable donnant la pluie printanière), ainsi que « Tracteur/SAU », traduisant le résultat de leurs entretiens avec les chasseurs, selon lesquels les machines agricoles seraient la deuxième cause de diminution de population de lièvres, après la diminution de la diversité du paysage. Rappelons que cette analyse est fondamentalement différente de la nôtre, ayant été menée sur la base de comptages de lièvres vivants, effectués entre 1991 et 2000, sur des zones qui correspondent à des surfaces d'habitat potentiel du lièvre.

L'équation déterminée par régression multiple et les règles identifiées par Pegase n'ont pas été utilisées pour en faire des modèles « prédictifs » de population de lièvres, ceci pour trois raisons : Tout d'abord, parce que le résultat calculé par ces modèles n'aurait été que la densité de lièvres tirés à la chasse. En effet, ces valeurs ne permettent pas de connaître le nombre réel de lièvres, mais

⁵ Lorsqu'une variable apparaît rapportée à différentes surfaces d'influence (SC, SAU, TO ou (SAU-TO)), nous parlerons, par défaut, de la variable la plus adéquate. Ainsi, entre « Main-d'œuvre/SC » et « Main-d'œuvre/SAU », la deuxième est, en général, plus représentative de la force engagée dans l'exploitation des domaines agricoles, donc travaillant sur la surface agricole utile. De même, entre « Vache/SC », « Vache/SAU » et « Vache/(SAU-TO) », la dernière semble plus intéressante, étant donné que les surfaces directement utilisées par le bétail sont les prairies et pâturages, c'est-à-dire la surface agricole utile non-terre ouverte (SAU-TO).

seulement de comparer les populations de lièvres de différentes zones ou à différentes époques. Ensuite, parce que Pegase n'inclut pour l'instant pas de module de prévision. Finalement, parce que la construction d'un modèle prédictif nécessite une opération de validation qu'il ne nous est pas possible d'effectuer dans ce travail, par manque de données.

6.3.3 Signification des variables clés pour le lièvre

Les 16 variables clés ainsi identifiées traduisent certains facteurs qui ont été découverts comme les plus importants pour le lièvre par différents auteurs :

Selon Nyenhuis (1998), la composition du paysage est un des facteurs prépondérants, et elle apparaît, dans nos variables clés, à travers les variables « Forêt/SC », « Maïs/SAU », « SAU/SC » et « Route et rail/SC ». En effet, la part de surface utilisée en forêt, pour les transports, ou pour l'agriculture, que ce soit pour le maïs ou pour d'autres cultures, est déterminante pour le lièvre :

- La majeure partie de la surface agricole constitue une grande part de l'habitat potentiel du lièvre, raison pour laquelle l'indice de lièvre est lié à la SAU (Pfister et al., 2002).
- Il existe probablement une part de surface en forêt optimale pour le lièvre, car elle constitue un refuge pour le lièvre, sans être le centre de son territoire (Pfister et al., 2002).
- Les cultures maïs ne sont pas appréciées par cet animal originaire des steppes, où la végétation n'est pas si haute (Pfister et al., 2002).
- Les surfaces de transports sont lieu d'accidents. A ce propos, Fraguglione (1975) précise que le lièvre souffre du trafic qui induit une mortalité directe importante : selon une étude suisse portant sur les causes pathologiques de décès, sur la période 1969 à 1972, 31% des cas sont des lièvres écrasés sur les routes. Il ajoute encore que l'inspection fédérale des forêts a relevé 1'100 lièvres tués par le trafic routier et ferroviaire en 1967 et 2'126 en 1973, c'est-à-dire une augmentation annuelle de 15%. Ce phénomène est traduit par notre variable « Voiture/SAU ».

L'autre facteur prépondérant est le climat (Nyenhuus, 1998) : il apparaît, dans nos variables clés, à travers les variables « Pluie » et « JoursT>5°C ». Selon Schröpfer & Nyenhuis (1982), la nature du sol a un impact direct sur le lièvre : le lièvre, étant un mammifère de petite taille, ne supporte pas bien un climat froid, et ce phénomène est encore accru lorsque le sol est l'humide. De plus, les sols humides sont colonisés par des joncs et des prêles, végétation inutilisable pour le lièvre. Les variables « Sol défavorable », « Pluie10 » et « JoursT>5°C » sont donc indispensables parmi nos variables clés. La variable « Position » traduit également un phénomène climatique, étant donné qu'il existe un gradient climatique orienté du Sud-Ouest vers le Nord-Est (Baeriswyl et al., 1997).

L'utilisation de plus en plus répandue et intensive des tracteurs est également un facteur important selon Nyenhuis (1998), car elle induit une mortalité directe des lièvres et surtout des portées de levrauts. Dans notre base de données, cette menace apparaît à travers la variable « Tracteur/SAU ». A celle-ci s'ajoute la variable « Main-d'œuvre/SAU » : La généralisation de la mécanisation permet de diminuer la main-d'œuvre nécessaire par exploitation agricole dès 1950. Mais, en même temps, le type de cultures change : par endroits et selon la culture pratiquée, la main-d'œuvre devient

indispensable en plus des tracteurs. Ces deux variables « Tracteur/SAU » et « Main-d'œuvre/SAU » évoluent d'une façon liée et relativement complexe, comme nous le verrons au chapitre 7 « La dynamique du paysage suisse en fonction des variables clés ».

Selon Fraguglione (1975), ce sont les nouvelles pratiques agricoles, découlant de l'augmentation de la population, qui, en provoquant l'accélération de la mécanisation ainsi que l'utilisation irrationnelle et parfois désordonnée des engrais chimiques et produits phytosanitaires, ont causé au lièvre des pertes considérables. Ce phénomène d'intensification des pratiques agricoles se reflète au travers de nos variables « Maïs/SAU », « Tracteur/SAU », « SubventionAF/SAU » et « Taille parcelles ». En effet, le maïs est une monoculture qui s'est fortement développée grâce aux nouvelles variétés de maïs créées, plus adaptées au climat suisse, ainsi que grâce à la mécanisation agricole. Cette dernière a été rendue possible grâce à l'augmentation de la taille des parcelles ainsi qu'à l'octroi de subventions d'améliorations foncières (Broggi & Schlegel, 1990). Schröpfer & Nyenhuis (1982) ajoute qu'une zone avec peu de cultures céréalières et plus de pâtures à fauche bien exploitées, arrive à des densités de lièvres plus élevées, ce qui se traduit, dans nos variables clés, par la proportion de maïs dans la SAU « Maïs/SAU », ainsi que par le bétail « Vache/SAU » : une forte proportion de maïs est défavorable au lièvre, alors qu'une forte densité de bétail sera probablement favorable, parce qu'elle suggère une plus faible proportion de cultures céréalière au profit de pâturages et prairies, avec des passages de machines moins fréquents, donc une moindre menace pour les portées de levrauts, et une nourriture pour le lièvre plus diversifiée. D'un autre côté, rappelons que, selon Frylestam (1976), le lièvre fuit les pâturages lorsque le bétail s'y trouve, et, selon Pfister (1995), les densités de lièvres sont faibles dans les zones où la production laitière est importante. Ceci n'est qu'un exemple de la complexité des réactions des populations de lièvres face aux différents éléments du paysage.

Il pourrait sembler étonnant que les variables « Zone urbaine/SC » et « Route&rail/SC » ne montrent pas de corrélation significative avec l'indice de lièvres (voir Annexe 6.4), alors qu'elles traduisent les phénomènes de développement des zones urbanisées, et d'extension du réseau de communications, deux causes probables de diminution des populations de lièvres selon Pfister et al. (2002). En effet, nous avons constaté qu'une analyse par régressions linéaire entre l'indice de lièvres et chacune de ces deux variables (effectuées avec le logiciel Statistica) aboutit à un résultat non-significatif à 5%, de même qu'entre le logarithme de l'indice de lièvres et chacune de ces deux variables. De plus, les deux nuages de points, montrant la relation pour chaque commune entre ces deux variables et l'indice de lièvres ne dessinent pas de formes caractéristiques qui pourraient dévoiler une structure dans les données. La forme du nuage de point n'est pas plus structurée entre les deux variables et le logarithme de l'indice de lièvres. Finalement, les droites ajustées sur ces nuages de points ont un coefficient d'ajustement extrêmement faible, ce qui montre que la relation n'est ni linéaire, ni logarithmique. Nous ne présentons pas ces résultats en détail ici. Cette absence de relation s'explique probablement par le fait que les aspects qualitatifs du réseau de transports et des zones urbaines ne sont pas inclus dans ces deux variables. Ainsi, la variable « Route&rail/SC », telle que nous l'avons définie, montre ses limites pour expliquer l'influence du réseau de transports sur les populations de lièvres : le lièvre est non seulement sensible au trafic induit par le réseau mis en place, qu'on peut considérer relié à la surface occupée par le réseau, mais également à la fragmentation de l'habitat créée par ces éléments linéaires qu'il considère comme des barrières. Or, pour tenir compte de la

qualité du réseau, il serait nécessaire de relever l'arrangement des routes et rail à l'intérieur des communes. La variable « Zone urbaine/SC » n'inclut pas non plus d'indication sur le type d'activité (industrie, habitat, etc.), ou encore sur la densité des constructions, qui peuvent avoir différentes influences sur le voisinage et donc sur le lièvre.

Remarquons que notre analyse par régression multiple, qui aboutit à une expression de l'indice de lièvre en fonction deux variables seulement, semble extrêmement simple par rapport à celle effectuée par Pfister et al. (2002), dont le résultat est une série d'expressions, impliquant un nombre important de variables.

Il faut préciser que deux des variables introduites dans la régression multiple en trois étapes de Pfister et al. (2002) ont une signification légèrement différente de celles de notre base de données auxquelles nous les avons fait correspondre : La surface continue de champs est plus restreinte que la SAU, qui est, elle, la réunion des différentes taches de surfaces cultivées ; le relief est calculé de la même façon que notre variable « Relief », mais il a été introduit dans le but de montrer la difficulté de compter les lièvres dans une zone vallonnée, alors que nous avons introduit la variable « Relief » afin de traduire le type d'agriculture possible.

Il est probable que les analyses effectuées ci-dessus auraient mené à des résultats différents, si nous avons tenu compte de tous les facteurs d'influence des populations de lièvre, par exemple la prédation, les maladies, les empoisonnements, etc. Ces facteurs ont été étudiés par différents auteurs (voir chapitre 2 « Etat des connaissances »), mais il serait intéressant de connaître leurs influences, combinées avec l'état du paysage. Par exemple, l'Office national de la chasse (1995) mentionne que les maladies n'ont un impact important que dans des cas ponctuels, dépendant des conditions locales et du moment.

6.4 Conclusion

La base de données Lièvre

Il ressort de nos trois analyses (corrélation, régression multiple, Pegase), que la base de données « Lièvre » (40 variables « Paysage » et un « Indice d'abondance de lièvres » décrivant 125 communes dans leur état dans les années 1980) inclut les variables qui permettent de décrire les effets les plus importants de l'influence humaine sur l'habitat potentiel du lièvre, ainsi que d'étudier leur influence sur le lièvre. Elle n'est certainement pas suffisante pour tenir compte de tous les facteurs : il est probable que les analyses effectuées ci-dessus auraient mené à des résultats différents, si nous avons pu inclure dans cette base de données la prédation, les maladies ou encore les empoisonnements par exemple.

L'indice d'abondance de lièvres

Un indice d'abondance de lièvres a pu être déterminé pour 125 communes, correspondant à la situation des années 1980. Il a été calculé à partir des statistiques de chasse affermée, comme étant le nombre de lièvres tirés, annuellement, en moyenne entre 1980 et 1985, par zone de chasse affermée, que nous avons rapporté à la surface communale. Les variations des statistiques de chasse sont souvent utilisées pour étudier les causes de variation des populations du lièvre (Pfister et al., 2002), bien qu'entachée d'incertitudes, surtout lorsque cette étude est effectuée sur une courte période et de petites surfaces. Selon l'Office national de la chasse (1995), les fluctuations annuelles des tableaux de chasse sont un reflet assez peu déformé de celles des populations de lièvre.

Les valeurs d'indice d'abondance de lièvres que nous avons calculées sont comprises entre 0.126 et 2.193 lièvres tirés, annuellement, en moyenne entre 1980 et 1985, par km² de surface communale totale (SC), et dont la moyenne (\pm SE) sur les 125 communes est de 0.565 (\pm 0.037). Exprimées par rapport à la SAU, ces valeurs sont comprises entre 0.270 et 11.835 par km² de SAU, ce qui correspond aux valeurs calculées ailleurs en Europe (Schäfers, 1996 ; Nyenhuis, 1998). Elles ne sont, par contre, pas comparables aux densités de lièvres données par Pfister et al. (2002), qui sont, elles, calculées sur la base de comptages nocturnes de lièvres vivants, dans des unités écologiques favorables aux lièvres, entre 1991 et 2000.

Les variables clés pour le lièvre

Les 16 variables clés pour le lièvre identifiées par les trois méthodes d'analyse ou provenant de la littérature, sont celles qui permettent d'expliquer la relation entre la population de lièvres et le paysage, pour la décennie 1980. Elles traduisent les facteurs qui ont été identifiés comme les plus importants pour le lièvre non seulement par Pfister et al. (2002), mais également par Fraguglione (1975), Frylestam (1976), Nyenhuis (1998), Pfister (1995) et Schröpfer & Nyenhuis (1982) :

- le trafic automobile (« Voiture/SAU »),
- l'intensification des pratiques agricoles à travers, entre autres : la mécanisation, source de mortalité directe, surtout pour les portées de levrauts (« Tracteur/SAU ») et l'augmentation de la taille des parcelles (« Taille parcelle »), rendues possibles grâce aux travaux d'améliorations foncières (« SubventionAF/SAU ») ; la diminution de la main-d'oeuvre (« Main-d'oeuvre/SAU ») ; la modification du type d'agriculture, impliquant une diminution de la variété de nourriture pour le lièvre (« Maïs/SAU », « Vache/(SAU-TO) »),
- la diminution de l'habitat potentiel du lièvre due, entre autres, à la diminution des zones rurales, conséquence du développement de l'urbanisation (« SAU/SC », « Route&rail/SC », « Forêt/SC »),
- la fragmentation du paysage par le réseau de transports (« Route&rail/SC » dans une certaine mesure),
- le climat, reproduit par la pluviométrie moyenne sur 10 ans, par le nombre de jours avec une température moyenne supérieure à 5°C, ainsi que, dans une certaine mesure, par la position par rapport à l'extrémité Sud-Ouest de la Suisse (« Pluie10 », « JoursT>5°C », « Position »),

- le type de sol, donnée par la part de surface avec sol mouillé ou peu perméable (« Sol défavorable/SC »),
- la morphologie, donnée par la part de surface avec une pente inférieure à 17%, ainsi que la différence d'altitude maximale (« Pente<17% », « Relief »).

Les méthodes d'analyses

Trois méthodes d'analyse de la base de données « Lièvre » ont été utilisées pour identifier les variables clés du paysage pour le lièvre dans les années 1980: corrélation, régression multiple, Pegase. A celles-ci ont encore été ajoutées celles de notre base de donnée qui correspondent le mieux à une partie des variables retenues par Pfister et al. (2002). Ces quatre méthodes ne poursuivent, en théorie, pas le même but, mais nous les avons utilisées de façon complémentaire, pour finalement identifier 16 variables clés pour le lièvre :

- A. La matrice de corrélation permet de sélectionner les variables « Paysage » qui sont liées de façon linéaire avec l'indice d'abondance de lièvres. Parmi elles, 4 sont des variables de type agricole (« Main-d'œuvre/SAU », « Subventions AF/SAU », « Taille parcelle », « Vache/(SAU-TO) »), une de type utilisation du sol (« Forêt/SC »), une de type morphologique (« Pente<17% »), une de type climatique (« JoursT>5°C »), et type géographique (« Position »).
- B. Selon notre analyse par régression multiple, deux variables « Paysage » permettent d'expliquer 50% de la variance de la relation entre l'indice d'abondance de lièvres et le paysage : « Voiture/SAU » (relation négative) et « JoursT>5°C » (relation positive).
- C. Pegase est tout à fait adéquat pour analyser ce type de base de données, comprenant des variables continues, nominales et ordonnées et permet, en théorie, de déterminer les combinaisons de variables qui expliquent le mieux la variation de l'indice d'abondance de lièvres par commune. Nos essais d'applications de Pegase montrent que le faible nombre d'unités à disposition (125 communes) ne permet pas d'assurer un fonctionnement optimal de la procédure, bien que nous ayons eu soin de discrétiser les variables continues selon des classes équiprobables, afin d'apporter une entropie maximum pour la variable cible de permettre le meilleur fonctionnement. Selon Phipps (1994), un jeu de données de l'ordre de 1'000 unités est nécessaire pour obtenir des résultats raisonnables. Nous retenons tout de même les 6 variables sélectionnées comme variables divisives pour les comparer aux variables clés pour le lièvre déterminées par d'autres méthodes. Parmi elles, 4 sont des variables agricoles (« Vache/(SAU-TO) », « Maïs/SAU », « Vache/SAU » et « SubventionAF/SAU »), l'une décrit l'occupation du sol (« SAU/SC »), et la dernière décrit le climat (« Jours T>5°C »).

Les essais d'application de Pegase selon différentes valeurs des trois critères (D, R et O) ne peuvent être considérés comme une analyse de sensibilité car ils souffrent de la petite taille du jeu de données (125 communes). Nous en retirons tout de même les informations suivantes :

- La discrétisation des variables continues semble être une étape préliminaire à Pegase dont l'influence sur le résultat est primordiale. Une discrétisation selon deux classes équiprobables semble permettre le meilleur résultat.

- Le choix des conditions d'arrêt de Pegase est important parce qu'il permet de simplifier le résultat, et de ne pas se perdre dans des détails de peu d'importance. Un minimum de 8 unités semble adéquat comme condition d'arrêt de la procédure de division.
- L'ordre de priorité, utilisé pour départager deux variables qui permettraient la même réduction d'entropie, influence le résultat dans une moindre mesure. L'ordre adéquat, ici, semble être celui où les variables concernant directement le lièvre sont placées en premier (par ordre décroissant : Zone urbaine, SAU, Bâtiment, Route&rail, Route nationale, Voiture, Main-d'œuvre, Maïs, Terre ouverte), puis les variables restantes.

D. Enfin, Pfister et al. (2002) présentent une régression multiple en plusieurs étapes, entre les populations de lièvres et les éléments paysagers des zones de comptages, qui feront ressortir de façon prépondérante la surface de champs continue, à laquelle correspond, dans une certaine mesure, « SAU/SC ». Viennent ensuite différents éléments du paysage, que nous traduisons par « Relief », « Route&rail/SC », « Sol défavorable/SC » et « Pluie10 ». Elle est complétée par des entretiens avec les chasseurs selon lesquels « Tracteur/SAU » est la deuxième cause de diminution de population de lièvres. Rappelons que cette analyse est fondamentalement différente de la nôtre, ayant été menée sur la base de comptages de lièvres vivants, effectués entre 1991 et 2000, sur des zones qui correspondent à des surfaces d'habitat potentiel du lièvre.

Les questions en suspens

Cette analyse de la base de donnée « Lièvre » repose sur des hypothèses de travail qui impliquent des limites au niveau de la représentativité des résultats. Il nous semble essentiel de poursuivre cette recherche dans les directions ouvertes par des questions concernant l'utilisation des données de la chasse, le choix des 40 variables intégrées dans notre base de données, l'adéquation de l'unité spatiale « communes » pour ces analyses, et finalement le calcul de notre indice d'abondance de lièvres. Ces questions sont exposées et discutées dans le chapitre 8 « Conclusions et perspectives » (Perspective n°2).

Il serait intéressant d'approfondir les analyses effectuées dans ce chapitre en étudiant la relation entre l'évolution des variables clés et l'évolution de la population de lièvres, sur la période de '50 à '90, compte tenu des relations identifiées dans ce chapitre entre le l'indice de lièvres et le paysage pour les années '80. En effet, les analyses effectuées en '80 étaient possibles du fait que l'indice de lièvre d'un certain nombre de communes a pu être calculé sur la base des statistiques de la chasse affermée, alors que ce nombre est extrêmement réduit dans les autres décennies (voir 6.1.1.2). Pour étendre cette étude à l'ensemble de la période, il est maintenant nécessaire d'imaginer d'autres méthodes, dans le but de, soit a) calculer un indice de lièvre sur un grand nombre de communes à chaque décennie, et effectuer les mêmes analyses que dans ce chapitre, soit b) analyser la relation entre l'indice de lièvres et le paysage. Dans ce dernier cas, les méthodes imaginées ne devront nécessiter qu'un nombre restreint d'unités. Ce point est également exposé et discuté dans le chapitre 8 « Conclusions et perspectives » (Perspective n°5).

Les apports de ce chapitre pour notre recherche

Cette façon de réduire le nombre de variables de 40 à 16 est plus intéressante que l'analyse en composantes principales (ACP), présentée au chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et de sa dynamique » : la sélection des variables est effectuée en fonction du but poursuivi, c'est-à-dire chercher quelles sont les variables clés pour le lièvre, alors que l'ACP visait à faire ressortir une structure dans les données, indépendamment de la façon dont le lièvre ressent le paysage.

Dans le chapitre 7 « La dynamique du paysage suisse en fonction des variables clés », nous allons étudier la dynamique de ces variables clés entre les années 1950 et les années 1990, sur l'ensemble des 936 communes. Ceci nous amènera à une description de l'évolution de l'état du paysage, mesuré en fonction des besoins du lièvre. Nous tenterons ensuite de définir deux scénarios d'évolution du paysage pour les années à venir, et d'évaluer comment les populations de lièvres réagiront. Pour le premier scénario, nous prolongerons les tendances d'évolution de ces variables clés observées entre les années 1950 et 1990. Pour le deuxième, nous reprendrons les idées discutées dans différents documents, rapports et projets de révisions de lois. Nous ne tenterons pas d'utiliser les résultats de ce chapitre 6 pour en faire un modèle prévisionnel, pour les raisons évoquées au chapitre 6.3.2.

Chapitre 7

La dynamique du paysage en fonction des variables clés

L'étude préliminaire des variables au chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et de sa dynamique » a permis d'obtenir une vision globale de chaque variable sur l'échantillon de 936 communes et sur l'ensemble de la période d'étude ('50 à '90) à travers les valeurs caractéristiques et distributions spatiales des variables ainsi que de leur évolution.

Au chapitre 6 « Le lièvre et le paysage », l'analyse de la base de données « Lièvre », décrivant l'état dans les années '80 de 125 communes sur lesquelles un indice d'abondance de lièvres a pu être calculé, nous a permis de déterminer les variables clés du paysage pour le lièvre.

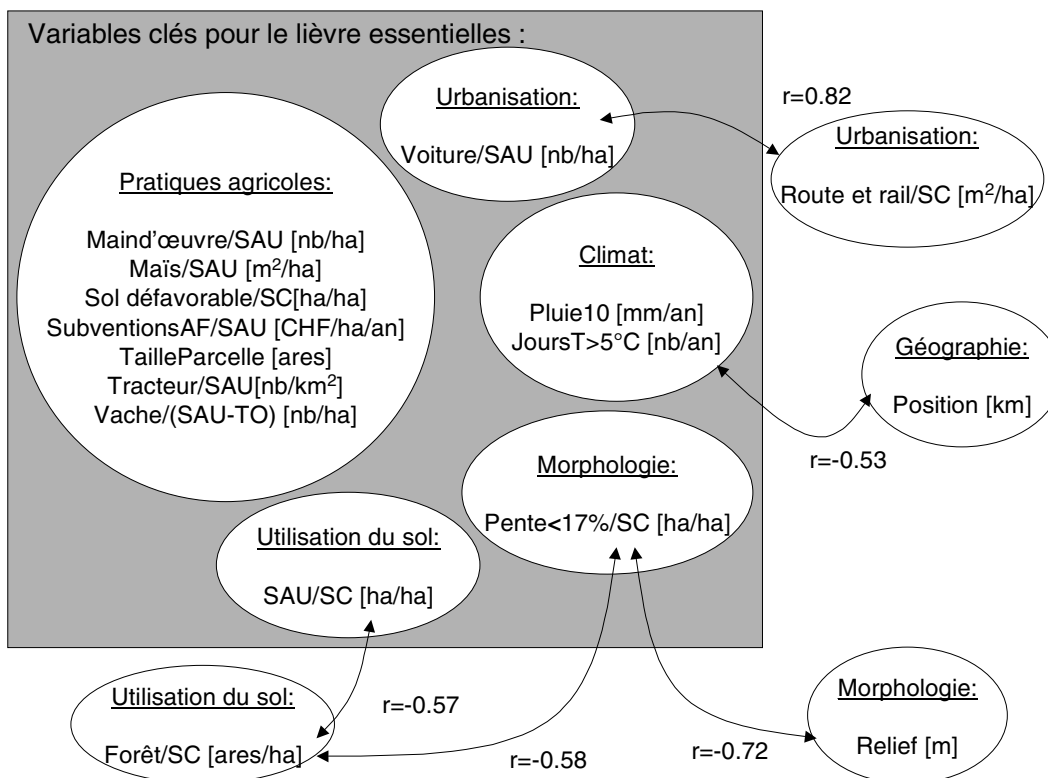
Dans ce chapitre, nous nous basons sur les résultats des chapitres 5 et 6 pour étudier la dynamique des variables clés pour le lièvre, sur l'échantillon de 936 communes et sur l'ensemble de la période d'étude ('50 à '90). Ceci nous amènera à une description de l'évolution de l'état du paysage, mesuré en fonction des besoins du lièvre. Nous tenterons ensuite de définir deux scénarios d'évolution du paysage pour les années à venir, et d'évaluer comment les populations de lièvres réagiront.

7.1 Méthode

7.1.1 Base de données « Paysage clé »

La base de données « Paysage clé » est un extrait de la base de données « Paysage », contenant les valeurs pour les 936 communes de 12 variables (Fig.7.1). Ces 12 variables ont été sélectionnées à partir des 16 variables identifiées comme variables clés pour le lièvre au chapitre 6. Le but étant de permettre la description détaillée de la dynamique du paysage de la façon la plus simple possible, de la même façon qu'un modèle reproduit la réalité de façon simplifiée, nous nous sommes efforcés de réduire encore le nombre de variables, en éliminant celles qui sont fortement corrélées entre elles : Nous avons retenu, comme essentielles pour la base de données « Paysage clé », uniquement les 12 variables peu corrélées entre elles de façon simple, c'est-à-dire avec un coefficient $|r| < 0.5$ (voir 7.1.2.2 ci-dessous), alors que 4 variables redondantes ($|r| > 0.5$) sont laissées de côté.

Fig.7.1 : Les 16 variables clés pour le lièvre identifiées au chapitre 6 et regroupées selon 6 types (voir Chapitre Base de données Paysage, Tab.7.3). Parmi elles, 12 sont retenues comme essentielles pour la base de données « Paysage clé » (corrélées entre elles de façon simple avec un coefficient $|r| < 0.5$) et 4 sont laissées de côté, parce que redondantes (corrélées avec des variables clés avec un coefficient $|r| > 0.5$, voir "Corrélation" ci-dessous).



7.1.2 Analyse des variables clés

7.1.2.1 Analyses statistiques descriptives

Les variables clés du paysage ont fait l'objet d'une analyse statistique descriptive au chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage » : histogrammes, boxplots, graphiques d'évolution des moyennes et médianes avec droites ajustées, graphiques d'évolution des valeurs de 30 communes exemples et cartes.

7.1.2.2 Corrélations

La matrice de corrélation permet de connaître le degré de linéarité entre les variables. La théorie de cet outil d'analyse est présentée au chapitre 6.

Nous avons calculé la matrice de corrélations :

- entre les couples des 40 variables « Paysage » parmi lesquelles sont comprises les 16 variables identifiées comme variables clés pour le lièvre au chapitre 6, sur les valeurs des 936 communes, en '50, '60, '70, '80 et '90,
- entre les couples des 12 variables clés de la base de données « Paysage clé » retenues comme étant essentielles (voir Fig.7.1) à chaque époque et des différences entre deux époques, c'est-à-dire sur les valeurs des 936 communes en '50 et sur $\Delta 50-60$, en '60 et sur $\Delta 60-70$, en '70 et sur $\Delta 70-80$, en '80 et sur $\Delta 80-90$.

Le but est de :

- Découvrir quelles sont, parmi les 16 variables clés pour le lièvre identifiées au chapitre 6, celles qui sont corrélées entre elles avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.5 ($|r| > 0.5$), afin de ne garder que l'une d'entre elles et ne conserver finalement que les variables clés essentielles à l'analyse détaillée de la dynamique du paysage (A).
- Découvrir des dépendances, révélées par les relations linéaires qui apparaissent dans ces matrices de corrélations, et qui permettraient de formuler des hypothèses sur les causes de la dynamique du paysage (B). En particulier :
- Découvrir des dépendances entre les valeurs donnant l'évolution entre deux décennies successives et l'état à la décennie de départ, par exemple, entre les changements de 1950 à 1960 ($\Delta 50-60$) et l'état en 1950 ('50), ou encore entre les changements de 1980 à 1990 ($\Delta 80-90$) et l'état en 1980 ('80) (B). De telles dépendances permettraient de formuler l'hypothèse que l'évolution d'une variable d'une décennie à la suivante est fonction de l'état d'une variable à la décennie de départ.

7.2 Résultats et discussion

7.2.1 L'évolution du paysage selon les variables clés

7.2.1.1 Corrélations simples entre les variables

Les variables sont toutes corrélées les unes aux autres, de façon plus ou moins marquée, simple ou complexe. Les coefficients de corrélations simples figurent dans les matrices de corrélations (Annexe 7.1). Rappelons qu'un coefficient de corrélation significatif révèle l'existence d'une relation statistique entre deux variables, mais par forcément une relation de cause à effet : Il peut arriver que deux variables évoluent dans le même sens parce qu'elles sont toutes les deux influencées par une troisième variable exogène. Dans ce cas, un degré de corrélation existe véritablement, mais il est absurde d'en déduire une relation de cause à effet.

Lorsque deux variables sont fortement corrélées (coefficient de corrélation $|r| > 0.5$), l'une d'entre elles peut être éliminée, ce qui permet de réduire le nombre de variables clés de cette base de données « Paysage clé ». Entre les couples de variables corrélées avec $|r| > 0.5$, nous avons choisi de conserver, pour la base de données « Paysage clé », celles dont la signification écologique nous paraissait la plus intéressante pour la discussion qui fera l'objet de la suite de ce chapitre (Fig.7.1). Ainsi, la surface de forêt s'exprime au travers de la SAU ($r = -0.57$ en '90), ainsi que de la surface relative avec pente inférieure à 17% ($r = -0.58$ en '90) ; le relief au travers de la surface relative avec pente inférieure à 17% ($r = -0.72$ en '90) ; la position au travers de la variable climatique qui exprime le nombre moyen annuel de jours avec une température moyenne supérieure à 5°C ($r = -0.53$ en '90) ; la surface de routes et rail au travers de la densité de voitures ($r = 0.82$ en '90). Bien que la variable « Route&rail » concerne plus directement d'utilisation du sol que « Voiture », il est préférable de ne l'inclure que de façon annexe dans cette base de données « Paysage clé », car ses valeurs de '50, '60, et '70 ne sont que difficilement comparables aux valeurs de '80 et '90 (voir chapitre 4 « Base de données Paysage », 4.1.3.5). Finalement, la base de données « Paysage clé » comprend 12 variables clé essentielles : Parmi celles-ci, l'une décrit l'utilisation du sol (« SAU/SC »), 7 décrivent les pratiques agricoles, une autre décrit l'urbanisation (« Voiture/SAU »), deux autres décrivent le climat (« Pluie10 » et « JoursT>5°C ») et la dernière décrit la morphologie (« Pente<17% »). Dans Tab.7.1 figurent les corrélations simples entre les couples de variables pour '80, ainsi que les corrélations entre les valeurs en '80 et les différences entre '80 et '90 ($\Delta 80-90$). Les corrélations correspondantes, aux autres décennies (en '50 et $\Delta 50-60$, en '60 et $\Delta 60-70$ et en '70 et $\Delta 70-80$) figurent dans l'annexe 7.2.

Tab.7.1 : Matrice de corrélation des 12 variables de la base de données "Paysage clé" à la décennie '80 (fond blanc) et des différences avec la décennie suivante ($\Delta 80-90$) (fond gris clair). Les corrélations avec un coefficient $|r| > 0.5$ sont marquées par un fond gris foncé. Les corrélations non-significatives sont indiquées par un -. Le coefficient minimum au-dessus duquel on peut rejeter l'hypothèse de non-corrélation est $r=0.0842$ ($\alpha=1\%$, $N=936$, $n.d.d.l.=934$).

1980 et $\Delta 80-90$		8	10	12	19	20	21	25	28	32	35	38	40	8'	10'	12'	19'	20'	21'	25'	28'	32'	
MainDoeuvre/SAU 80	8	1.00	-0.10	-	-	0.13	-	0.47	-	0.58	-	-	-	-0.58	-	-	-	-0.10	-	-	-	-	0.59
Mais/SAU 80	10	-0.10	1.00	-0.19	-	-	-0.15	-	0.37	-	0.31	0.15	-	-	-0.41	-	0.09	-0.10	-	-	-	-0.09	-
Pluie10 80	12	-	-0.19	1.00	-	-	0.19	-	-	-0.15	-	0.14	-0.28	-	-	0.20	-	0.12	-	-	-	-	-
SAU/SC 80	19	-	-	-	1.00	0.17	0.25	-	0.29	-0.16	0.29	0.15	-0.14	-	-	-	-	-	-0.14	0.10	-	-	-0.16
SubventionAF/SAU 80	20	0.13	-	-	0.17	1.00	-	0.13	0.23	-0.12	-	-	0.16	-0.09	-	-	-	-0.74	-0.12	-	-	-	-0.11
TailleParcelle 80	21	-	-0.15	0.19	0.25	-	1.00	-0.28	-	-	-	-	-0.21	-	-	-	-	0.17	-0.44	-	-	-	-
Tracteur/SAU 80	25	0.47	-	-	-	0.13	-0.28	1.00	0.18	0.28	-	-	-0.19	-0.24	-0.21	-	0.09	-0.34	-	-0.39	-0.11	0.23	-
Vache/(SAU-TO) 80	28	-	0.37	-	0.29	0.23	-	0.18	1.00	-0.10	0.39	0.16	-0.13	-	-0.17	-	0.28	-0.19	-	-0.14	-0.39	-0.13	-
Voiture/SAU 80	32	0.58	-	-	-0.16	-0.12	-	0.28	-0.10	1.00	-	-	-	-0.58	-	-	-	-	-	-0.19	-	-	0.91
Pente<17/SC	35	-	0.31	-0.15	0.29	-	-	-	0.39	-	1.00	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SolDefavorable/SC	38	-	0.15	0.14	0.15	-	-	-	0.16	-	0.22	1.00	-0.21	-	-	-0.12	-	-	-	-	-	-	-
Jour T>5°C	40	-	-	-0.28	-0.14	0.16	-0.21	-0.19	-0.13	-	-	-0.21	1.00	-	-	0.20	-	-	0.10	-	0.10	-	-
MainDoeuv./SAU $\Delta 80-90$	8'	-0.58	-	-	-	-0.09	-	-0.24	-	-0.58	-	-	-	1.00	-	-	-0.13	-	-	0.19	-	-	-0.51
Mais/SAU $\Delta 80-90$	10'	-	-0.41	-	-	-	-	-	-0.17	-	-	-	-	-	1.00	-	-0.12	-	-	-	-	0.16	-
Pluie10 $\Delta 80-90$	12'	-	-	-	0.20	-	-	-0.21	-	-	-	-0.12	0.20	-	-	1.00	-	0.09	-	-	-	-	-
SAU/SC $\Delta 80-90$	19'	-	0.09	-	-	-	-	0.09	0.28	-	-	-	-	-0.13	-0.12	-	1.00	-	-	-0.28	-0.27	-	-
SubventAF/SAU $\Delta 80-90$	20'	-0.10	-0.10	0.12	-	-0.74	0.17	-0.34	-0.19	-	-	-	-	-	-	0.09	-	1.00	0.15	-	-	-	-
TailleParcelle $\Delta 80-90$	21'	-	-	-	-0.14	-0.12	-0.44	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	0.15	1.00	-	-	-	-
Tracteur/SAU $\Delta 80-90$	25'	-	-	-	0.10	-	-	-0.39	-0.14	-0.19	-	-	-	0.19	-	-	-0.28	-	-	1.00	0.18	-	-
Vache/(SAU-TO) $\Delta 80-90$	28'	-	-0.09	-	-	-	-	-0.11	-0.39	-	-	-	0.10	-	0.16	-	-0.27	-	-	0.18	1.00	-	-
Voiture/SAU $\Delta 80-90$	32'	0.59	-	-	-0.16	-0.11	-	0.23	-0.13	0.91	-	-	-	-0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00

Une grande partie des corrélations simples entre couples de variables se retrouvent à chaque décennie (Annexe 7.2) : même si le coefficient varie légèrement, le signe lui ne change pas, montrant une certaine constance dans les relations entre les éléments du paysage.

La part de surface agricole utile « SAU/SC » est un des indicateurs essentiels de l'évolution du paysage, visible dans le paysage et avec de fortes répercussions parce que l'utilisation du sol en cultures exclut la construction de bâtiments ou d'infrastructures. Cette variable « SAU/SC » indique la présence d'activités agricoles, mais ne renseigne pas sur le type d'exploitation. Celui-ci est donné par 7 variables clés indicatrices du type d'agriculture, qui apportent chacune une précision indispensable, et dont « Maïs/SAU » peut être considérée comme un deuxième indicateur de l'évolution du paysage, pas significativement corrélé avec « SAU », qui apporte une information essentielle sur le degré d'intensité des pratiques agricoles : l'exploitation en maïs est souvent de type plus intensif que l'exploitation d'une partie de la surface agricole utile non terre ouverte (par exemple les prairies et les pâturages). Le type d'exploitation agricole est également lié au nombre de main-d'œuvre agricole par SAU et au nombre de tracteurs par SAU. Ces deux variables sont positivement corrélées à chacune des cinq décennies (coefficient de corrélation $r = +0.44$ en '50, $+0.47$ en '60, $+0.44$ en '70, $+0.47$ en '80 et $+0.54$ en '90), montrant que ces deux forces de travail ne s'excluent pas mutuellement, mais se complètent : différents types de cultures se sont développés, nécessitant soit des machines agricoles pour les grandes cultures telles que le maïs, soit une main-d'œuvre que le tracteur ne peut pas remplacer pour les cultures spécialisées, telle que la viticulture ou l'horticulture. Remarquons au passage que la densité de tracteurs exprimée par rapport à la SC (et non pas celle exprimée par

rapport à la SAU) est bien corrélée, de façon significative et positive, avec la surface relative de pente inférieure à 17% (Annexe 7.1), comme le laissait présager le fait que la variable « Pente<17% » a été définie pour caractériser les surfaces peu pentues qui peuvent être travaillées avec des machines agricoles (voir chapitre « Base de données Paysage »). La SAU est corrélée de façon significative et positive avec la densité de vaches (r compris entre +0.18 et +0.47), ce qui reflète la limitation du cheptel en fonction de la surface cultivée, et avec la taille des parcelles (r compris entre +0.09 et +0.25), ce qui montre que les domaines sont morcelés lorsque la surface agricole utile totale est réduite et que l'agrandissement des domaines et le regroupement des terres en parcelles de plus grandes tailles s'est effectué en parallèle.

Les variables climatiques et morphologiques sont corrélées entre elles, montrant une certaine dépendance statistique du climat par rapport à la morphologie. Elles influencent les pratiques agricoles, ce qui se remarque par leur corrélation significative avec la surface agricole utile et la surface cultivée en maïs qui reviennent à la plupart des décennies. Ainsi, « Pluie » est corrélée négativement avec « Maïs/SAU », alors que « Pente<17% » est corrélée positivement avec « Maïs/SAU » et « SAU/SC » : Sur une commune où la pluviométrie est importante, la surface cultivée en maïs sera petite, alors que sur une commune où la part de surface avec une faible pente est élevée, la surface cultivée en maïs et la SAU seront importantes.

Un troisième indicateur de l'évolution du paysage est le reflet de l'urbanisation : « Voiture/SAU », qui représente les différentes constructions (bâtiments, routes et rail, zones urbaines) visibles dans le paysage et avec de fortes répercussions sur l'occupation du sol, excluant des zones de nature, et totalement liées à la population (fortes corrélations avec « Population/SC », Annexe 7.1). La densité de voitures est corrélée négativement avec la SAU, montrant que l'urbain ne va pas de pair avec l'agriculture.

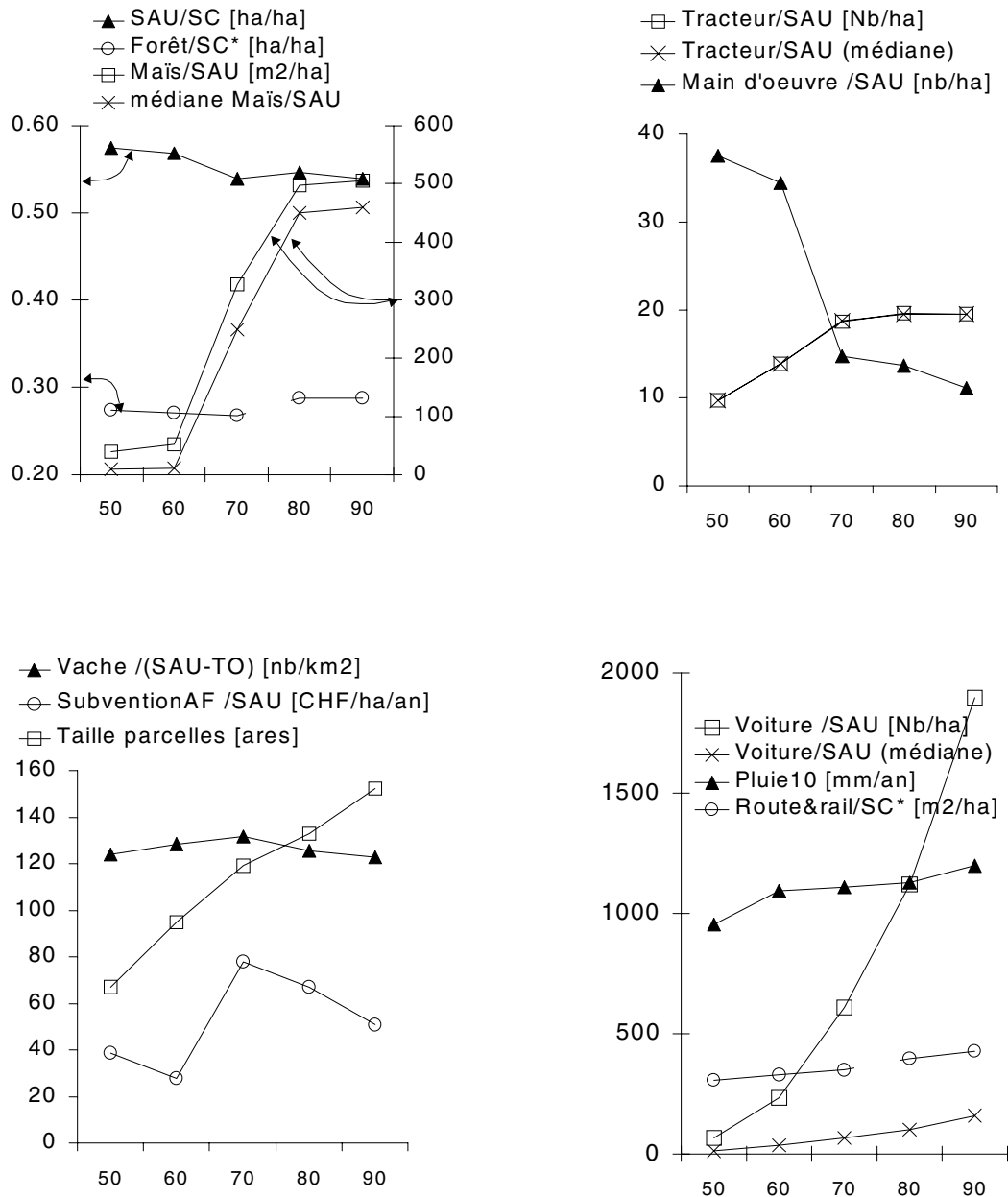
Remarquons la forte corrélation positive entre « Voiture/SAU » et la main-d'œuvre en '80, qui est un exemple de relation statistique dont la raison n'est pas une relation de cause à effet, comme évoqué ci-dessus, mais plus probablement l'influence d'une troisième variable exogène.

L'évolution de la densité de voitures entre deux décennies est très clairement à mettre en relation avec la densité de voitures déjà existantes (par exemple la valeur de $\Delta 80-90$ et la valeur en '80, Tab.7.1) : le développement est plus important là où le parc automobile est déjà important, ce qui révèle une accélération de l'accroissement. Ce phénomène de dépendance entre l'évolution et l'état initial s'observe également pour la main-d'œuvre et les subventions AF mais dans l'autre sens : Elles tendent à diminuer fortement là où elles étaient conséquentes, alors que la diminution est moins marquée là où elles sont déjà plus petites, montrant un ralentissement de la décroissance. Pour les 6 autres variables évolutives dans le temps, la corrélation entre la différence entre deux décennies et la décennie de départ est très changeante d'une époque à l'autre : Ainsi, pour les deux tiers des variables, l'évolution d'une décennie à l'autre ne dépend pas de la valeur au départ.

7.2.1.2 Dynamique et distribution spatiale

La surface rurale, qui est, rappelons-le, l'habitat potentiel du lièvre brun, diminue de façon constante et significative : entre les recensements de 1979/85 et 1992/97 de l'OFS (2001), la surface agricole utile a perdu globalement en Suisse 482 km², un recul de 3.1%. Notre étude aboutit une diminution de la part moyenne de SAU de 6.1%¹ durant la période 50-90 (Fig.7.2), accentuée entre 1960 et 1970 par une chute importante.

Fig.7.2 : Evolution des moyennes des variables clés et évolution des médianes de « Maïs/SAU », « Tracteur/SAU » et « Voiture/SAU ». (N=936 communes)



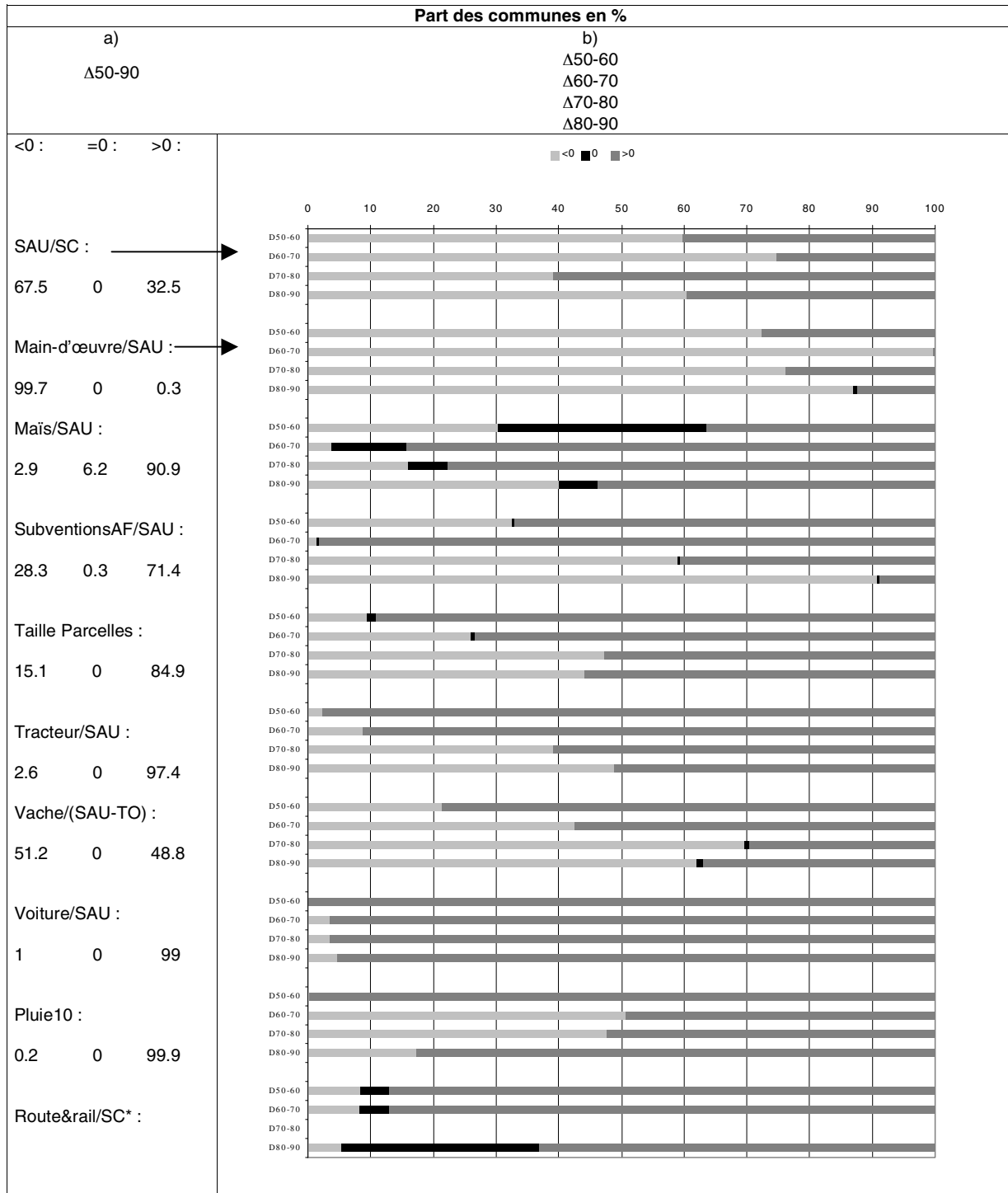
¹ Les augmentations ou de diminutions indiquées dans ce chapitre sont données en % de la valeur initiale. Exemple : Soit la valeur 57% en 1950. Une diminution de 6.1% entre 1950 et 1990 signifie que la valeur est de $57 - (0.061 \cdot 57) = 54\%$ en 1990.

Environ deux tiers des communes de notre échantillon montrent une diminution de SAU entre 1950 et 1970 ainsi qu'entre 1980 et 1990 (Fig.7.3). Elles se situent pour la plupart sur le Plateau central (voir les cartes de distribution spatiale de l'Annexe « Bd & Variables », sur un CD). Il s'agit, entre autres, des communes aux alentours des grandes villes, comme Zurich, St-Gall, Bâle, Berne, Genève et Lausanne. L'OFS (1999) indique que près de 62% de la SAU se trouve dans les régions de plaine. Les communes qui voient leur SAU augmenter (de plus de 1% pour un quart de celles-ci) sont celles avec des terrains en pente (faibles valeurs de « Pente<17%/SC »), dans la chaîne du Jura et dans les Préalpes, à une altitude médiane élevée et avec un relief important. En effet, l'augmentation des moyens agricoles (perfectionnement des tracteurs, drainage, construction de routes d'accès) a permis l'exploitation de ces terres moins favorables à la culture. Pourtant, les surfaces qui disparaissent sont d'après l'OFS (2001) essentiellement des prés, des terres arables fertiles et des plantations d'arbres haute-tiges, dans des lieux faciles à cultiver, peu accidentés, mais malgré tout économiquement plus intéressants pour la construction. Deux tiers des surfaces agricoles qui disparaissent sont situés en plaine et sont remplacés par de nouvelles constructions d'habitat et d'infrastructures, entre autres les voies de communication. Or, ces constructions ne peuvent s'étendre que sur les zones rurales non-boisées, la forêt étant protégée depuis plus d'un siècle (actuellement par la Loi fédérale sur les forêts (LFo) de 1991). Sur l'ensemble du territoire, la surface construite a ainsi gagné 13,3% entre 1979/85 et 1992/97, passant de 382 à 397 m² par habitant, dont la part pour l'habitat (28%) est importante du fait du nombre croissant de petits ménages et de maisons individuelles.

En plus de la diminution de la surface rurale, mise en évidence par le recul de la surface agricole utile, la composition de la zone rurale, ainsi que son rôle par rapport à la zone urbaine, ont évolué de façon marquée. Selon Kienast (1993), la structure du paysage en Suisse s'est appauvrie, surtout pendant la période de l'après-guerre, à cause des pratiques agricoles intensives et de l'utilisation industrielle du sol, pour arriver à son niveau le plus bas à partir des années '50 avec une faible diversité des types de lisières et une grande fréquence d'éléments qui forment des barrières. Dès 1970, cet auteur observe une tendance à l'amélioration de la structure, probablement due aux efforts de conservation apportés à partir de cette époque. Ceci pourrait laisser croire à une diminution de l'intensité des pratiques agricoles, mais on remarque souvent, et pas seulement en Suisse, que la qualité des éléments qui ont été apportés pour augmenter la diversité dans le paysage est inférieure à la qualité des éléments enlevés originellement (Fjellstad & Dramstad, 1999). Le même phénomène apparaît en Suède (Ihse, 1995), où un certain nombre de changements rapides de la structure du paysage sont répertoriés, menant même à des subventions pour prestations écologiques, mais dont l'apport pour la biodiversité est faible. Pour revenir à la Suisse, la surface de forêt continue à augmenter, mais sa valeur écologique et esthétique diminue, en raison, entre autres, des rectifications de lisières, modification qui provoque une séparation de plus en plus distincte entre la forêt et les terres agricoles, avec la perte de biodiversité que cela entraîne (Sigmaphan/Metron/Metrotest, 1994). Notre étude nous permet de mesurer un aspect de la structure du paysage : sa composition. C'est la part des différents types de cultures (par exemple le maïs) et les indicateurs de pratiques agricoles (par exemple le nombre de tracteurs), qui vont nous donner des indices sur la qualité, en terme de diversité du paysage agricole : monotone avec peu d'éléments naturels ou semi-naturels (haies, lisières étagées, bandes herbeuses, friches) ou bocager et avec de nombreux éléments de ce type. Nous ne sommes

pas en mesure d'étudier l'autre aspect de la structure du paysage, sa configuration, parce que nous ne connaissons pas la position relative des éléments paysagers dans les communes.

Fig.7.3 : Proportion des communes avec une évolution des variables clés négative (<0), nulle (=0) ou positive (>0) en % : a) entre le début et la fin de la période d'étude ($\Delta 50-90$) ; b) entre les décennies ($\Delta 50-60$, $\Delta 60-70$, $\Delta 70-80$, $\Delta 80-90$). *Valeurs '50, '60, '70 pas comparables aux valeurs '80, '90 car les sources de données sont différentes (voir chapitre 4 « Base de données Paysage », 4.1.3.5).



Durant la période 1950 à 1990, le type de culture des surfaces agricoles se modifie : la part de surfaces cultivées en maïs est multipliée par un facteur 8 entre les années '60 et '80 (Fig.7.2), pour aboutir à plus de 5% de la SAU en '90, une part un peu plus élevée que la moyenne suisse (4.3%) relevée par l'OFS (1999). Les surfaces cultivées en maïs étant souvent synonymes de grandes cultures mécanisées, c'est le phénomène d'intensification des pratiques agricoles qui apparaît. Plus de 70% des communes montrent un accroissement de surfaces en maïs entre '60 et '80, et près de 90% des communes entre '50 et '90 (Fig.7.3). En même temps, une part importante des communes (entre 6% et 33%) ont une surface relative cultivée en maïs stable. La médiane et la moyenne de « Maïs/SAU » évoluent de façon parallèle, montrant que, quelle que soit la SAU, l'évolution de la part de culture en maïs est relativement homogène sur l'ensemble des communes. Par contre, on voit se démarquer avec le temps des communes avec une croissance de surface de culture en terre ouverte plus marquée (divergence des moyennes et des médianes de « Terre ouverte/SAU », Annexe « Bd & Variables »). Les cultures en maïs, ainsi que les terres ouvertes en général, se trouvent le plus fréquemment dans les zones avec peu de relief du Jura et du Plateau (partie Nord-Ouest pour les terres ouvertes ; partie Sud-Est pour le maïs). La distribution spatiale de ce type de cultures ne semble pas être liée à la part de surface de sols défavorables (humides et peu drainants), dont les valeurs les plus importantes se situent nettement en Suisse centrale, à l'extrémité Nord du canton de Schwyz, à l'extrémité Nord-Est du canton de St-Gall, ainsi que sur le littoral Est du lac de Bienne. Remarquons que la composition des cultures est très variable dans les différents pays d'Europe (OFS, 1999): En Grande-Bretagne, les cultures de terre ouverte représentent presque la même part de la SAU qu'en Suisse (38.8% contre 38.7%), mais la part de maïs n'est que de 0.8% ; En Autriche, les terres ouvertes représentent 41% de la SAU, dont 7.8% de maïs ; En Suède, les terres ouvertes représentent 78.2% de la SAU, mais le maïs est presque inexistant.

Le nombre de vaches, exprimé par unité de surface agricole utile non terre ouverte (« Vache/(SAU-TO) »), augmente de $6.1\%^2$ entre '50 et '70, puis diminue de 6.8% jusqu'en '90. Selon l'OFS (1999), cette tendance à la diminution continue encore maintenant : le cheptel bovin, constitué pour plus de 90% de vaches laitières, a diminué de 4.5% entre 1991 et 1996, alors qu'en Europe cette diminution est de 3% (sans l'Autriche, la Suède et la Finlande). Mais le nombre de vaches par exploitation est en constante augmentation : de 5.2 en 1951, il passe à 12.3 en 1993. Ce secteur de production représente un pilier important de l'agriculture suisse surtout là où les grandes cultures sont plus difficiles à cause du relief et du climat. Avec une production de 3.4 milliards de francs (prix courant) en 1990, la production laitière représente d'ailleurs la plus grande part de production finale (34%) du secteur agricole. Nous constatons que la densité de vaches est quand même nettement plus forte en plaine que dans les Préalpes et le Jura (voir Annexe « Bd & Variables »). Le cheptel de vaches laitières diminue de façon très importante dans les régions de Genève, Berne, Zurich et St-Gall entre '50 et '90, mais il augmente dans le canton du Jura, sans toutefois arriver au niveau du Plateau.

L'intensification des pratiques agricoles se remarque également au travers du très fort accroissement de l'utilisation des tracteurs (« Tracteur/SAU ») surtout entre '50 et '70, période pendant laquelle la

densité augmente de 92%, sur plus de 90% des communes. La médiane et la moyenne, évoluant de façon parallèle (Fig.7.2), montrent que quelle que soit la SAU, l'évolution de la densité de tracteurs est relativement homogène sur l'ensemble des communes. En même temps, on observe une diminution de densité de main-d'œuvre de 70% (elle passe d'une moyenne de 38 employés par km² de SAU en 1950 à 11 en 1990). L'OFS (2001) annonce que la part de personnes employées à l'exploitation des terres agricoles passe de 31% en 1900 à 4.7% à l'heure actuelle. C'est d'ailleurs l'ensemble du secteur primaire qui est touché par cette régression : selon l'USP (1996), la part des personnes actives occupées dans le secteur primaire en Suisse (4.5%) est légèrement inférieure à la moyenne européenne (5.3%).

L'évolution inverse des moyennes de « Tracteur/SAU » et de « Main-d'œuvre/SAU » n'est pas contradictoire avec le fait que les deux variables sont positivement corrélées à chacune des cinq décennies (voir les matrices de corrélations en Annexe 7.1, discutées au paragraphe précédent). En effet, cette situation résulte de l'imbrication de plusieurs phénomènes : (1) L'évolution inverse des moyennes de ces deux variables est en partie le signe d'un changement de pratiques agricoles, conséquence du développement de la technologie, qui permet une généralisation de la mécanisation et, en même temps, une diminution de la main d'œuvre nécessaire par exploitation agricole. D'autre part, ce phénomène est aussi dû à la rationalisation qui se manifeste partout en Europe, qui nécessite de diminuer les coûts. L'OFS (1999) note d'ailleurs qu'en 1996, la part des personnes actives occupées dans le secteur primaire en Suisse est légèrement inférieure à la moyenne européenne : 4.5% contre 5.3%. (2) Les corrélations positives entre ces deux variables à chacune des 5 décennies (Tab.7.1 et Annexe7.2) sont le signe que ces deux forces de travail ne s'excluent pas mutuellement, mais se complètent : différents types de cultures se sont développés, nécessitant, soit des machines agricoles pour les grandes cultures comme le maïs, soit une main-d'œuvre que le tracteur ne peut pas remplacer pour les cultures intensives spécialisées comme la viticulture ou l'horticulture, dont la part relative s'est accrue (en tout cas entre les recensements de 1979/85 et de 1992/97 de l'OFS (2001)). Les tracteurs et la main-d'œuvre sont donc des forces qui travaillent sur deux parties distinctes de la SAU. (3) Les relations observées, à chacune des décennies, bien qu'ayant des coefficients de corrélations très semblables, sont, en fait, relativement différentes, comme on peut le constater sur les scatterplots correspondant à ces 5 décennies qui figurent dans l'Annexe 7.3 : les nuages de points sont orientés différemment à chacune des 5 décennies. La corrélation entre ces deux variables, sur l'ensemble des 5 décennies, est par contre négative (Annexe 7.3), ce qui permet aux moyennes des deux variables d'évoluer de façon contraire. (4) Finalement, nous posons l'hypothèse que les communes dont la densité de tracteurs est importante sont parmi celles dont la densité de main-d'œuvre est également importante, en '50 comme en '60, '70, '80 et '90. Pour cette raison, la densité de tracteurs est peu importante dans les communes du bassin Lémanique, là où se cultive la vigne, ainsi que dans les communes des Préalpes et de la chaîne du Jura avec un relief plus accidenté. Dans ces deux dernières régions, la part de surface avec une pente inférieure à 17%, accessible aux tracteurs, est d'ailleurs bien entendu plus faible que sur le Plateau.

² Rappelons que les tendances qualitatives montrées par les droites ajustées sur les moyennes ne dépendent en général pas du fait que la variable est rapportée à la surface communale ou à la surface directement concernée (SAU, TO ou SAU-TO) (voir Chapitre 5 « Etude préliminaire du paysage et sa dynamique »).

La période autour de 1970 est également le moment des grands travaux de remaniements parcellaires et d'équipement des domaines agricoles : les subventions accordées aux milieux agricoles (« SubventionsAF/SAU ») sont extrêmement élevées, pendant cette décennie, pour diminuer ensuite à nouveau. Ces subventions étaient destinées à augmenter la production des terres agricoles par le biais de remaniements parcellaires, de construction de routes d'accès, de drainage et d'irrigation. Ceci conduit à l'apparition de parcelles³ agricoles de plus en plus grandes, un travail des terres plus rationnel et intensif, menant à une transformation profonde du paysage rural : Selon notre étude, la taille des parcelles augmente de 127% entre '50 et '90, pour aboutir à une valeur moyenne de 152 ares. D'après l'USP (1996), le nombre moyen de parcelles par exploitation a diminué (par exemple de 10 en 1939 à 6 en 1990 dans le canton de Vaud, de 9 à 6 dans le canton d'Argovie) en même temps qu'un grand nombre de petites exploitations disparaissent, laissant place à des domaines de plus grandes tailles : Selon l'OFS (2001), 19.5% des exploitations ont disparu entre 1985 et 1996. En 1990, la surface moyenne des exploitations est environ de 13ha (OFS, 1999), c'est-à-dire comme celles mesurées en Autriche, aux Pays-Bas et en Belgique, un peu au-dessous de la moyenne européenne. Remarquons au passage la Grande-Bretagne qui se distingue avec une taille moyenne de près de 70ha.

L'occupation du territoire pour le transport, avec 127 m² par habitant, est supérieure à celle pour l'habitat, mais son accroissement est par contre en ralentissement selon l'OFS (2001). Notre étude montre un accroissement de la densité de véhicules automobiles par SAU de 2'809% entre '50 et '90 (Fig.7.2), ou de 1'809% lorsqu'elle est exprimée par unité de surface communale. Il s'accompagne d'un développement très marqué de la surface relative occupée par les routes et chemins de fer (+15% entre '50 et '70 et +9% entre '80 et '90, voir « Route et rail/SC » dans Annexe « Bd & Variables »), sans qu'il soit possible d'affirmer lequel des deux phénomènes est la conséquence de l'autre : 99% des communes montrent une augmentation de densité de voitures entre '50 et '90, et plus de 85% un accroissement du réseau de routes et rail entre '50 et '70, aboutissant à une augmentation totale en surface, sur notre échantillon de 936 communes, de 0.45% entre 1950 et 1970, et de 0.35% entre 1980 et 1990. Il s'agit non seulement de nouvelles routes, mais également de transformation de chemins d'accès en routes avec revêtement imperméables. En effet, pour compenser la transformation des terres cultivables en surfaces d'habitat, on cherche à densifier le réseau local d'infrastructures et à perfectionner son aménagement afin de faciliter l'accès aux parcelles cultivées et d'intensifier l'exploitation, ce qui provoque aussi une augmentation du trafic à des fins non agricoles sur ces routes. En parallèle, le réseau supra local augmente chaque année de 100km, entièrement au détriment des surfaces agricoles utiles (OFS, 2001). Cette densification du réseau des routes nationales facilite le développement de zones d'habitations et de zones industrielles hors des agglomérations. De ce fait, 57% des nouvelles constructions d'habitation se trouvent dans des communes rurales selon l'OFS (2001). Combinée avec la diminution de SAU, la courbe d'évolution de notre variable « Voiture/SAU » prend une allure dramatique qui accentue le phénomène réel de motorisation de la population. Elle reflète tout de même une réalité : la pression

³ Une parcelle est un terrain continu appartenant à une personne, et peut être cultivée en plusieurs champs de différentes cultures (voir chapitre 4 « La base de données paysage »).

des véhicules et du trafic est importante sur la zone agricole, par opposition à la zone construite. On voit se démarquer, avec le temps, des communes avec une évolution des réseaux de transports et du nombre de voitures véritablement alarmante (forte divergence de la moyenne et de la médiane de « Voiture/SAU », Fig.7.2). Les communes avec les plus grandes densités de voitures et également les plus fortes augmentations de densités sur la période 50-90, sont évidemment celles appartenant aux agglomérations, là où la SAU est réduite et où se trouve également la plus forte proportion de population. Terminons en remarquant que le trafic automobile privé constitue la plus grande part du trafic en Suisse : selon l'(OFS, 1991), le trafic non-urbain se compose pour 87.6% en 1985 (87.7% en 1990) de voitures de tourisme, le reste étant constitué par les autocars, voitures de livraisons, poids lourds et motocyclettes. L'augmentation annuelle du trafic automobile privé non-urbain, de même que celle du trafic global non-urbain, est de 4.3%. Entre 1970 et 1995 et sur l'ensemble du réseau routier suisse, Küng (2001) parle d'une augmentation de personnes-kilomètres de 66% et d'une augmentation de tonnes-kilomètres du trafic de marchandises de 70%.

Les conditions climatiques ne se sont que légèrement modifiées durant la période 50-90 : la pluviométrie moyenne sur 10 ans a augmenté de 20%, mais le nombre de jours avec température moyenne supérieure à 5°C peut être considéré comme constant dans le temps. Le réchauffement apparaissant à partir des années '80 n'a probablement pas de répercussions sur les populations de lièvres avant les années '90 (voir Chapitre « Base de données Paysage »), et le cas échéant, c'est un facteur d'influence bénéfique. Les différences spatiales sont, par contre, importantes : La partie Nord-Est de la zone d'étude a un nombre de jours par année moyen avec une température moyenne supérieure à 5°C compris entre 131 et 150, alors que le canton de Vaud et le centre du canton de Berne en ont plus de 200. Le nombre de jours annuel moyen avec précipitations ainsi que la pluviométrie annuelle moyenne sur 10 ans sont plus élevés à l'extrémité nord-est de la zone d'étude, dans les Préalpes et dans la partie haute du Jura (nord du canton de Berne et sud du canton du Jura). Les conditions climatiques ne sont donc pas influencées uniquement par l'altitude et le relief. On constate un gradient entre le Nord-Est et le Sud-Ouest de la zone d'étude, allant d'un climat plus froid et pluvieux à un climat plus clément, tendance confirmée par Baeriswyl et al. (1997).

7.2.2 Le paysage suisse au futur

Scénario A : « Prolongation de l'évolution observée des valeurs moyennes »

Admettons que les tendances d'évolution de nos variables clé pour le lièvre, observées sur la période d'étude, se poursuivent (Fig.7.2) au-delà des années '90, que devient cet animal dans le paysage suisse ?

La lente diminution de la SAU exercera peu à peu une pression sur l'habitat potentiel du lièvre. En même temps, les surfaces de routes et voies de chemin de fer, dont l'augmentation est forte, réduiront rapidement son habitat, et surtout fragmenteront de plus en plus le paysage, morcelant son habitat, et créant des barrières souvent infranchissables pour l'animal. L'accroissement extrêmement rapide du nombre de voitures entraînera un nombre encore plus important de lièvres tués chaque année sur les routes. Comme ces tendances ne semblent pas se ralentir et que les populations de lièvres sont

actuellement déjà faibles, donc sensibles, la situation pourrait devenir en peu de temps extrêmement critique pour le lièvre.

Par contre, si les surfaces cultivées en maïs restent stables, comme c'est le cas entre les années '80 et '90, et que les subventions AF continuent de diminuer, comme elles l'ont fait depuis les années '70, alors les populations de lièvres devraient réagir positivement à ces signes de ralentissement de l'intensification des pratiques agricoles. De plus, si la mécanisation du travail des champs ne s'accroît plus, comme on le constate entre '80 et '90, alors le dérangement pour les lièvres et la part de levrauts happés par les tracteurs ne devraient pas non plus devenir plus important qu'actuellement. On peut s'imaginer que les tendances vers l'extensification et vers l'intensification des pratiques agricoles se feront sur des zones distinctes, comme le mentionne Jans (1996), ce qui, selon cet auteur, peut avoir des répercussions négatives sur la nature et le paysage, mais qui peut aussi éventuellement créer des zones favorables pour le lièvre où il pourrait se réfugier, étant donné qu'il se contente d'un « territoire » de 10 à 20 ha qu'il partage avec des congénères. Selon Pfister et al. (2002), une zone de petite taille, mais avec des ressources diversifiées en nourriture, est favorable au lièvre. Mais ceci n'est possible que dans le cas où des corridors relient ces zones favorables pour permettre un échange entre les populations, ce qui nécessite des aménagements spécialement conçus pour la faune (passages souterrains, ponts à faune) sur le réseau de routes et de voies de chemin de fer.

Tenter de dessiner l'évolution future de nos variables clés pour le lièvre pourrait faire l'objet d'une recherche en soi. En effet, l'évolution du paysage ne découle pas essentiellement de la dynamique passée, mais beaucoup plus de la planification prévue par la politique d'aménagement du territoire, ainsi que la planification prévue par la politique agricole, qui, elle, subit l'influence des conditions-cadre économiques (salaires, taux d'intérêt, etc.) et des dispositions légales concernant la concurrence. Selon Burel & Baudry (1990), ce sont les lois agricoles qui ont le plus d'importance et elles sont d'autant plus difficiles à prendre en compte que les agriculteurs appliquent les règlements en fonction de leurs capacités ainsi que du contexte technique et environnemental. Fjellstad & Dramstad (1999) concluent leur étude de la dynamique du paysage en Norvège, en remarquant que l'histoire des changements qui ont mené à l'état actuel, ne devrait pas dicter la planification de la gestion future, mais qu'il y a tout de même des leçons à en tirer : En particulier, ils constatent que les lois et les mécanismes dictés par l'économie peuvent mener à des changements dramatiques dans le paysage et peuvent, pour cette raison, également être des outils puissants pour atteindre un certain but. Nous allons donc maintenant nous tourner vers la littérature pour tenter de formuler un nouveau scénario, plus nuancé que le scénario décrit ci-dessus. Nous essaierons alors de comparer ces deux variantes d'évolution du paysage, ainsi que leurs impacts sur sa population (Tab.7.2).

Scénario B : « Selon les prévisions liées à la réforme agricole et à l'aménagement du territoire »

Un certain nombre de tendances pour le futur sont discutées dans le projet de réforme agricole par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG, 2000), dans l'avant-projet de modification de la loi vaudoise sur

l'aménagement du territoire et des constructions (Biéler, 2001) (commenté par Wegelin (1996)), et dans le suivi de la statistique suisse de la superficie par l'Office fédéral de statistiques (OFS, 2001). Nous essaierons de tirer de ces textes les tendances pour le futur de nos variables (➔), en particulier pour les variables clés pour le lièvre, avant d'évaluer l'impact de ce scénario sur sa population (Tab.7.2) :

Utilisation du sol :

La tendance générale de construction est de 1.5% du territoire par année et elle mène à une diminution de la densité de l'occupation du territoire. Cette tendance ne pourra pas être arrêtée en l'absence de mesures complémentaires à celles proposées dans le cadre des projets touchant l'aménagement du territoire (PNR 41 (Marti & Henz, 2001)). Selon Wegelin (1996), les surfaces pour l'habitation (résidence principale) hors de la zone à bâtir sont en nette évolution, tendance qu'il juge préoccupante. Comme elle ne peut que se faire au détriment de la surface agricole (la forêt étant protégée par Loi fédérale sur les forêts (LFo) de 1991), la légère augmentation de la SAU, constatée entre 1990 et 1995 (+1.3%), n'est probablement pas représentative de la tendance future. D'ailleurs, l'OFAG (2001b) constate une nouvelle diminution de la SAU entre 1995 et 2000 de 0.1%. Selon Wegelin (1996) toujours, les friches et les surfaces de forêts devraient augmenter sur l'ensemble de la Suisse suite à l'extensification des pratiques agricoles.

Le pays étant déjà pourvu d'un bon réseau de voies de communications, la croissance de celui-ci s'est ralentie depuis les années '80 selon l'OFS (2001) : elle était de 9.6% entre les relevés de 1979/85 et de 1992/97, donc une croissance annuelle d'environ 0.7%. Par contre, certaines infrastructures, construites pendant ces dernières 30 à 40 années (dessertes agricoles, parties de réseaux routiers), ne seront plus utiles sur certaines zones, alors qu'elles feront défaut sur d'autres (Wegelin, 1996). D'après ce même auteur, toutes ces évolutions seront très différenciées selon la distance par rapport aux agglomérations.

- ➔ ⁴augmentation de « Bâtiment/SC » et de « Zone urbaine/SC »
- ➔ diminution de « SAU/SC »
- ➔ ralentissement de la croissance de « Route et rail/SC »
- ➔ augmentation de « Forêt/SC »

Urbanisation :

Les scénarios de développement du trafic voyageur par les voitures jusqu'en 2020 de Küng (2001) montrent une augmentation d'environ 20 à 30% entre 2000 et 2020.

- ➔ augmentation de « Voiture/SAU »

Pratiques agricoles :

La politique agricole suisse est en cours de révision. Une première partie de sa réforme (« Politique agricole 2002 » ou PA 2002) a abouti à l'élaboration d'une nouvelle loi sur l'agriculture (LAgr), et elle

⁴ ➔ : Transposition des tendances discutées par l'OFAG (2000), Biéler (2001), (Wegelin, 1996) et l'OFS (2001).

est suivie actuellement d'une deuxième étape (PA 2007). Dans les années '90, les défis que devait relever l'agriculture suisse se situaient dans la planification simultanée des aspects économiques et écologiques de celle-ci (OFAG, 2000). Ces prochaines années, il s'agira de gérer les divergences entre les aspects économiques et sociaux de l'agriculture. En effet, la compétitivité implique une adaptation de la structure agricole allant au-delà de l'évolution naturelle, c'est-à-dire plus rapide que la cessation d'exploitations au rythme des générations. Il faudra donc imaginer de nouvelles activités pour ceux qui étaient jusqu'à présent agriculteurs. Ainsi, selon l'OFAG (2000):

- La part de la population active, travaillant dans les domaines de la production agricole, continuera de diminuer, ce qui inclut probablement une diminution de la main-d'œuvre à plein temps. Celle-ci diminue d'ailleurs fortement (-21%) entre 1995 et 2000 selon l'OFAG (2001b). D'après Wegelin (1996), les domaines seront de plus en plus exploités à temps partiel, de façon combinée avec une activité accessoire.

➔ diminution de « Main-d'œuvre/SAU »

- La population en Suisse n'augmentera pas autant que dans les autres pays d'Europe, et la structure démographique sera caractérisée par un fort vieillissement, impliquant des changements de la demande, entre autres, dans le domaine de l'alimentation.

➔ ralentissement de l'augmentation de « Population/SC »

- La taille des exploitations n'augmentera pas beaucoup : les formes d'exploitations de type industriel appartiendront à une minorité, l'exploitation familiale sera, comme jusqu'à présent, une forme d'organisation concurrentielle. Le rendement augmentera par contre encore fortement, grâce à l'amélioration des machines agricoles et par l'augmentation de la performance des moyens de production (sélection des variétés cultivées, engrais plus performants). D'après Wegelin (1996), on peut s'attendre à ce que des domaines soient regroupés et se spécialisent dans certaines activités.

➔ augmentation de « Tracteur/SAU » et de « Lait », légère augmentation de « Taille des parcelles »

- L'agriculture fournira de multiples prestations en faveur de la collectivité comme le stipule le « contrat de société » établi dans la constitution, en même temps que son importance dans l'économie (part de la valeur ajoutée) continuera de diminuer. Ceci laisserait croire que la production de masse laissera la place sur une partie du territoire à une agriculture avec un fort rendement, et sur l'autre à une utilisation différente du sol : Selon Biéler (2001), on passerait d'une agriculture productiviste à une agriculture durable et compétitive dont les objectifs sont de : reconnaître la multifonctionnalité du territoire rural ; favoriser la multifonctionnalité de l'agriculture et de la sylviculture ; développer le tourisme et les loisirs comme des atouts ; préserver et valoriser les milieux naturels comme éléments clés de la qualité du territoire rural ; de gérer les ressources naturelles. Mais l'aspect compétitif est indispensable pour résister à la pression créée par l'ouverture des frontières aux produits agricoles, qui mènera à l'augmentation des importations et exportations de ces produits.

A partir de 1996, la Confédération encourage une agriculture aussi écologique que possible et une exploitation du sol, conforme aux exigences du développement durable, en accordant des paiements directs aux exploitants qui contribuent, par leur travail, au maintien des ressources naturelles, à l'entretien du paysage rural et à l'occupation décentralisée des zones urbaines (OFS, 2001). On s'attend à ce que les conséquences de cette nouvelle politique soient multiples et contradictoires dans un proche avenir : par exemple, une partie de la surface agricole utile est convertie en pâturages extensifs, alors qu'une autre cède la place à des cultures intensives à forte valeur ajoutée, telles que la viticulture et l'horticulture. L'OFAG (2001) note que les surfaces de compensation écologique (SCE) ont progressé depuis leur institution en 1993. En particulier, la forte croissance de ces surfaces entre 1995 et 1996 s'explique par la conversion d'un grand nombre d'exploitations du mode de production traditionnelle au mode de production intégrée (PI) ou biologique, ce dernier étant appliqué sur 5% de la SAU en plaine et 30% dans les régions de montagne en 1999. La croissance de SCE entre 1996 et 1999 est due à l'introduction de la part minimale de SCE dans la SAU pour avoir droit à des paiements directs : 5% en 1997 et 7% en 1999. L'objectif pour 2005 est que la part de SCE atteigne 10% de la SAU, dont au moins 65'000ha en plaine. En parallèle, la biodiversité devrait être protégée et encouragée selon l'OFAG (2001), l'objectif pour 2005 étant de réimplanter des espèces menacées et ne plus avoir de liste rouge d'espèces menacées d'extinction. On note déjà de légères modifications dans le paysage : L'OFS (1999) mentionne un faible recul du maïs en Suisse entre 1996 et 1997.

- ➔ diminution de la part des surfaces « Terre ouverte/SAU » et « Maïs/SAU »
- ➔ augmentation des subventions au travers des paiements directs, qui viendront compléter les « SubventionAF/SAU »
- ➔ augmentation de « Main-d'œuvre/SAU » sur les zones de cultures intensives à forte valeur ajoutée, telles que la viticulture et l'horticulture.
- Les subventions AF seront maintenues. L'enveloppe financière pour la période 2004-2007 prévoit même une augmentation par rapport à la période 2000-2003 pour ce type de subventions, qui incluront également un soutien pour l'entretien des ouvrages AF déjà existants. Selon (Thomas & Kissling, 2001), ces subventions devraient être étendues à l'entretien des éléments écologiques (haies, ruisseaux, surfaces de compensations écologiques, etc), actuellement à la charge des communes et cantons. Une telle aide profiterait à l'agriculture, permettant aux agriculteurs de réaliser ces entretiens contre rémunération.
 - ➔ Augmentation des « SubventionAF/SAU », destinées non seulement aux nouveaux travaux, mais également à l'entretien d'ouvrage AF et éventuellement à l'entretien d'éléments écologiques.
- Concernant l'évolution de la pluviométrie, (Frei et al., 2001) prévoient pour l'ensemble de la Suisse une légère tendance à l'augmentation, bien que statistiquement non-significative.
 - ➔ légère augmentation de « Pluie10 ».

Ces prévisions sur l'évolution future regroupées dans ce scénario B sont synthétisées dans le Tab.7.2.

Tab.7.2 : Tendances pour le future exprimées dans les deux scénarios A et B décrits ci-dessus et évaluation qualitative de leurs impacts sur le lièvre.

Relation avec le lièvre : (1) indication du sens de la relation (positive + ou négative -) provenant de notre interprétation des connaissances des experts voir Chapitre « Etat des connaissances » ; (2) coefficients de corrélation (N=125) ; (3) coefficient déterminé par régression multiple (N=125). **Tendance future** : (↗) augmentation, (↘) diminution ou (→) pas de changement. **Conséquence sur les populations de lièvres** : (↗) augmentation de population, (↗→) augmentation faible, (↘) diminution ou (→) pas d'influence sur la population. **Comparaison des scénarios A et B** : **Conséquence sur les populations de lièvres** (>) plus favorable, (<) moins favorable, (=) égal.

*Diminution de la main-d'œuvre en général, mais augmentation de la main-d'œuvre sur des surfaces limitées, avec des cultures à forte valeur ajoutée (viticulture, horticulture).**Subventions AF destinées à l'entretien des ouvrages AF (conséquences négatives sur le lièvre) et éventuellement à l'entretien des éléments écologiques (conséquences positives sur le lièvre).***Nombre de vaches brut (non rapporté à la surface).****Les paiements directs sont apparus à la fin de notre période d'étude et vont avoir de plus en plus d'importance dans le futur, raison pour laquelle ils apparaissent dans ce tableau, bien qu'ils ne fassent pas partie de nos variables « paysage » au même titre que les subventions AF.

	Relation entre les variables et le lièvre	Scénario A : « Prolongation de l'évolution des moyennes observée (Fig.7.2) »		Scénario B : « Selon les prévisions liées à la réforme agricole et à l'aménagement du territoire »		Comparaison des scénarios A et B Conséquence sur les pop. de lièvres
		Tendance future	Conséquence sur les pop. de lièvres	Tendance future	Conséquence sur les pop. de lièvres	
Variables clés :						
SAU/SC	+ (1)	↘	↘	↘	↘	A=B
Forêt/SC	+0.28 (2)	↘	↘	↗	↗	A<B
Main-d'œuvre/SAU	-0.39 (2)	↘	↗	↘ et ↗ *	↗ et ↘	A>B *
Mais/SAU	- (1)	→	→	↘	↗	A<B
Subventions AF/SAU	-0.44 (2)	↘	↗	↗	↗ et ↘ **	A>B **
Taille parcelle	-0.25 (2)	↗	↘	↗	↘	A=B
Tracteur/SAU	- (1)	↗→	→	↗	↘	A>B
Vache (SAU-TO)	-0.39 (2)	↘	↗	↘ ***	↗	A=B ***
Voiture/SAU	-0.0001 (3)	↗	↘	↗	↘	A=B
Route&rail/SC	- (1)	↗	↘	↗→	↘	A<à=B
Pluie10	- (1)	↗→	↘	↗→	↘	A=B
Au total :			3↗ 2→ 6↘	5↗ 0→ 8↘		
Autres variables :						
Paiements directs ****	+ (1)			↗	↗	
Bâtiment/SC	- (1)			↗	↘	
Zone urbaine/SC	- (1)			↗	↘	
Population/SC	- (1)			↗	↘	
Lait ([kg/an/vache])	?			↗	?	
Terre ouverte/SAU	- (1)			↘	↗	

Compte tenu de ces prévisions des tendances pour le futur regroupées dans ce scénario B, que devient le lièvre dans le paysage suisse ?

L'augmentation de surface de forêt, la diminution des surfaces de maïs et l'apparition des paiements directs pour des surfaces de compensation écologiques laissent penser que la situation deviendra meilleure pour le lièvre que dans notre scénario A. L'impact extrêmement négatif de l'augmentation du réseau de routes et voies de chemin de fer donné par notre scénario A peut être nuancé parce que l'augmentation ralentit, ce que notre courbe d'évolution des moyennes ne montre pas. Il est probable que le paysage continue à se fragmenter, mais à un rythme moins rapide que dans le scénario A. Par contre, ce scénario B prévoit une augmentation de tracteurs plus forte que la stabilisation que nous avons observée, entraînant des conséquences, pour le lièvre, encore plus négatives qu'actuellement. L'augmentation prévue de Subventions AF n'est pas uniquement négative pour le lièvre, car ces subventions ne financent pas uniquement la construction de nouveaux ouvrages, mais également l'entretien des ouvrages AF et éventuellement l'entretien des éléments écologiques.

Les tendances d'évolution de SAU, de la taille moyenne des parcelles, du nombre de vaches et du nombre de voiture, et de la pluviométrie sont semblables dans les scénarios A et B.

Finalement, parmi les variables clés pour le lièvre, 6 dans le scénario A (8 dans le scénario B) montrent une tendance d'évolution pour les années à venir dont les conséquences sont négatives sur les populations de lièvres, alors que seules 3 d'entre elles, dans notre scénario A (5 dans le scénario B), montrent une tendance d'évolution qui permet une réduction de la pression sur les populations de lièvres, et 2, dans notre scénario A, prévoient un statu quo par rapport à la situation à la fin des années '90.

Les autres variables mentionnées dans le scénario B, qui ne font pas partie du jeu des variables clés pour le lièvre, révèlent une augmentation de la population ainsi qu'un empiètement de l'urbanisation (zones urbaines et bâtiments hors des zones urbaines) sur les zones rurales, en particulier sur les surfaces agricoles, des phénomènes menant à une forte pression sur les populations de lièvres.

7.3 Conclusion

Les variables clés pour le lièvre brun pour étudier la dynamique du paysage ?

Les 16 variables clés pour le lièvre répertoriées dans Fig.7.1 permettent de décrire et analyser certains aspects et processus liés à l'utilisation du sol, aux pratiques agricoles, à l'urbanisation, au climat, à la morphologie et à la géographie. 12 d'entre elles sont essentielles, les autres sont redondantes. Pourtant, dans ce chapitre, nous avons souvent mentionné d'autres variables pour expliquer les liens entre les éléments, les phénomènes ou les évolutions, en particulier « Route et rail », « Terre ouverte » et « Population ». En effet, ces facteurs représentent également des éléments marquants et des forces agissantes importantes. On se doute aisément que les 40 variables de la base de données « Paysage » sont, dans une mesure non-négligeable, liées entre elles. Mais les relations sont probablement plus complexes que les relations linéaires simples révélées par la matrice

de corrélation calculée au chapitre précédent (voir Annexe 6.4). Nous en concluons qu'il est difficile de parler d'évolution du paysage sans mentionner le développement des réseaux de transports, des grandes cultures et de la démographie ou des mouvements de population.

Ces 16 variables clés pour le lièvre sont construites, pour la plupart, à partir de recensements statistiques (voir Chapitre 4 « Base de données Paysage »), ce qui permet de travailler à une large échelle spatiale et d'examiner les tendances générales sur l'ensemble de la zone d'étude. La composition des communes est connue par le biais du nombre ou de la surface relative de chaque élément, mais leur configuration à l'intérieur de chaque commune reste inconnue. Nous n'obtenons donc qu'une partie de l'information concernant la structure du paysage.

Dynamique des variables clés pour le lièvre entre '50 et '90

Les dynamiques des variables clés pour le lièvre, résumées par les évolutions de leurs valeurs moyennes sur les années '50, '60, '70, '80 et '90 (voir Fig.7.2), sont révélatrices de phénomènes essentiels lorsqu'on parle d'évolution du paysage :

- Le développement de l'urbanisation : une diminution de la SAU, extrêmement marquée entre '60 et '70, et qui se poursuit encore depuis '80.
- L'intensification des pratiques agricoles : une forte augmentation de la part des terres agricoles cultivées en maïs entre '60 et '80, suivie d'une phase de ralentissement de croissance ; une forte augmentation de la densité des tracteurs entre '50 et '70, suivie, elle aussi, d'une phase de ralentissement de croissance ; une diminution de la densité de main-d'œuvre entre '50 et '90 ; une augmentation de la densité de vaches laitières entre '50 et '70, suivie d'une diminution ; une augmentation constante de la taille moyenne des parcelles entre '50 et '90 ; une augmentation très forte des subventions agricoles entre '60 et '70, suivie d'une constante diminution.
- L'extension des réseaux de transports : une croissance extrêmement rapide de la densité de voitures entre '50 et '90, qui s'accélère même avec le temps, et qui induit -ou est induite par- une augmentation de la densité du réseau routier.
- Variation des conditions naturelles : le climat semble se modifier avec une légère augmentation de la pluviométrie.

Relation entre la régression du lièvre et la dynamique du paysage entre '50 et '90

Les évolutions des valeurs moyennes des variables clés pour le lièvre illustrent de façon extrêmement révélatrice les causes de régression des populations de lièvres avancées par les experts du lièvre, en particulier (Pfister et al., 2002). Afin de vérifier que cette évolution des populations est effectivement liée à la dynamique du paysage, telle que nous la décrivons dans ce chapitre, il serait essentiel de poursuivre cette recherche sur un nombre plus restreint de communes, pour lesquelles il existe des statistiques de lièvres tirés à la chasse sur une longue période.

Rappelons que c'est à cause des lacunes dans ces données statistiques de la chasse qu'il ne nous a pas été possible d'analyser, avec des méthodes statistiques et avec Pegase, la relation entre le lièvre

et le paysage sur l'ensemble de la période d'étude : ce n'est que dans les années '80 qu'il nous a été possible de calculer un indice d'abondance de lièvres sur un nombre suffisant de communes (voir chapitre 6 « Les variables clés explicatives »). Mais, dans le cas où seul un sous-échantillon restreint de communes serait considéré, il serait possible de calculer l'indice d'abondance de lièvres à chacune des décennies entre '50 et '90, et finalement d'observer la relation entre cette évolution et celle des variables clés. En raison de la petite taille de ce sous-échantillon, il ne s'agirait probablement pas d'observations basées sur des analyses statistiques, mais plutôt d'études de cas.

Evolution du paysage dans les années à venir en fonction des variables clés pour le lièvre

L'observation de l'évolution des variables clés pour le lièvre nous a permis de définir un scénario (A) d'évolution du paysage pour les années à venir, selon lequel les tendances observées sur la période d'étude se poursuivent au-delà des années '90. Ce scénario se résume ainsi (Tab.7.2) : une lente diminution de la SAU, une forte augmentation des surfaces de routes et voies de chemin de fer, un accroissement du nombre de voitures extrêmement rapide, une stabilisation des surfaces cultivées en maïs, une diminution des subventions AF, une légère augmentation de la pluviométrie et une certaine augmentation de la mécanisation des pratiques agricoles, révélée par l'agrandissement des parcelles, la diminution de la main-d'œuvre et une certaine augmentation du nombre de tracteurs, allant en se stabilisant. Notre scénario (A) correspond à la situation où la gestion des différents domaines ayant une influence sur le paysage ne serait pas adaptée en fonction des nouveaux besoins.

Un deuxième scénario (B) a été défini, sur la base des tendances pour le futur annoncées dans 3 rapports liés à la réforme agricole et à l'aménagement du territoire (projet de réforme agricole par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG, 2000) ; avant-projet de modification de la loi vaudoise sur l'aménagement du territoire et des constructions (Biéler, 2001) ; suivi de la statistique suisse de la superficie par l'Office fédéral de statistiques (OFS, 2001)), Bien que peu différent du scénario (A), il amène quelques nuances, du fait que les tendances exprimées proviennent, en partie, de la volonté de modifier l'évolution actuelle par l'adoption de mesures et de lois (Tab.7.2) : une augmentation de surface des forêts, une diminution des surfaces de maïs et une apparition des paiements directs pour des surfaces de compensation écologiques ; l'augmentation du réseau de routes et voies de chemin de fer est ralentie, mais le paysage continue à se fragmenter ; les subventions AF ne servent plus uniquement à la construction de nouveaux ouvrages, mais également à l'entretien des ouvrages existants et éventuellement à l'entretien des éléments écologiques ; une augmentation de tracteurs plus forte que la stabilisation que nous avons observée, mais, par contre, une diminution de la part des terres ouvertes dans la SAU. En plus, il prévoit une augmentation de la population, ainsi qu'un empiètement de l'urbanisation (zones urbaines et bâtiments hors des zones urbaines) sur les zones rurales, en particulier sur les surfaces agricoles.

Conséquences des scénarios de dynamique du paysage sur les populations de lièvres

Les tendances d'évolution pour le futur révélées dans ces deux scénarios A et B, combinées avec les liens entre les variables et le lièvre identifiées précédemment (voir Chapitre 6), mènent à un bilan probablement défavorable pour le lièvre (Tab.7.2) : les évolutions de 6 variables clés (parmi 11

intégrées dans les deux scénarios) entraîneraient des conséquences négatives sur le développement des populations de lièvres. Ces dernières sont révélatrices des causes de régression du lièvre avancées par les experts du lièvre (Pfister et al., 2002) :

- l'augmentation de la taille des parcelles et l'augmentation de la densité de tracteurs, révélatrices de l'intensification des pratiques agricoles,
- la diminution de la SAU un signe du développement de l'urbanisation,
- l'augmentation de la densité de voitures, ainsi que celle des routes et rail, conduisant à l'extension des réseaux de transports,
- la légère augmentation de la pluviométrie, annonciatrice du développement de conditions naturelles climatiques un peu plus défavorables pour le lièvre.

Selon les deux scénarios, seules les évolutions prévues de deux variables clés présentent des conséquences positives pour le développement des populations de lièvres (diminution de la part de maïs, diminution de la densité de vaches). Les évolutions annoncées pour les 3 variables restantes (Forêt, Main-d'œuvre, Subventions AF) sont différentes selon les deux scénarios, ne nous permettant pas d'émettre une évaluation globale pour le lièvre.

Chapitre 8

Conclusions et perspectives

Dans ce dernier chapitre, nous répondons aux questions posées en guise d'objectifs au chapitre 3, en nous appuyant sur certaines conclusions des chapitres 4, 5, 6 et 7. Ceci nous amènera à souligner les points qui méritent d'être approfondis, et les nouvelles questions qui se posent dans différents axes de la recherche, en guise de perspectives ou de suites possibles à notre travail. Nous terminerons en résumant brièvement les apports essentiels de notre recherche pour la science de l'écologie du paysage, ainsi que pour la mise en pratique de mesures touchant la protection du paysage et de la faune.

8.1 Réponses aux objectifs et perspectives

Objectif A :

Quelles sont les variables clés parmi les variables descriptives du paysage qui traduisent les éléments déterminants pour l'évolution des populations de lièvres ? Les différentes méthodes utilisées (méthodes d'études de dépendances, méthode d'analyse Pegase) sont-elles appropriées pour analyser la relation entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables explicatives du paysage afin d'identifier ces variables clés pour le lièvre ? (→ Chapitre 6)

Identification de 16 variables clés pour le lièvre

16 variables clé ont été identifiées comme déterminantes pour le lièvre brun, grâce à l'analyse de la base de donnée « Lièvre », qui comprend 40 variables « Paysages » décrivant 125 communes dans leur état dans les années '80. Les variables clés décrivent certains aspects l'utilisation du sol, les pratiques agricoles, l'urbanisation, le climat, la morphologie et enfin la position géographique (Fig.7.1).

Elles traduisent les facteurs qui ont été identifiés comme des causes importantes de diminution des populations de lièvres par différents auteurs (Nyenhuis, 1998 ; Fraguglione, 1975 ; Schröpfer & Nyenhuis, 1982) : le trafic automobile, la fragmentation du paysage par les routes, et l'intensification des pratiques agricoles.

Des méthodes d'analyses complémentaires

Notre stratégie de combiner différentes méthodes d'analyses nous a permis d'identifier ces 16 variables clés pour le lièvre, tout en tenant compte de différents points de vue et en conservant une vision large du problème. Les méthodes d'études de dépendances entre l'indice d'abondance de lièvres et les variables « Paysage », la méthode d'analyse Pegase et les informations données par Pfister et al. (2002), bien qu'elles ne poursuivent pas le même but, se sont révélées être complémentaires :

- La matrice de corrélation, en répertoriant les corrélations simples, permet de sélectionner les variables « Paysage » qui sont liées de façon linéaire avec l'indice d'abondance de lièvres. Parmi elles, 4 sont des variables de type agricole (« Main-d'œuvre/SAU », « Subventions AF/SAU », « Taille parcelle », « Vache/(SAU-TO) »), une de type utilisation du sol (« Forêt »), et une de type morphologique (« Pente<17% »). Elles traduisent essentiellement le phénomène d'intensification de l'exploitation agricole, en partie responsables de la régression des populations de lièvres selon Pfister et al. (2002). Apparaissent encore une variable climatique (« JoursT>5°C »), ainsi qu'une

variable de type géographique (« Position »), qui traduisent le fait que le lièvre préfère un climat clément, lequel est le plus fréquent dans le Sud-Ouest du pays.

- La régression multiple sélectionne les variables « Voiture/SAU » et « JoursT>5°C » comme étant suffisantes pour expliquer 50% de la variance de la relation entre l'indice d'abondance de lièvres et le paysage. La densité de voitures agit négativement sur le lièvre, alors que le nombre de jours avec une température supérieure à 5°C agit positivement sur le lièvre.
- Pegase permet de déterminer les combinaisons de variables qui expliquent le mieux la variation de l'indice d'abondance de lièvres par commune. Nos essais d'applications de Pegase montrent que nous nous trouvons à la limite du domaine de fonctionnement de la méthode et que le faible nombre d'unités à disposition (125 communes) ne permet pas d'assurer un fonctionnement optimal de la procédure. Un jeu de données de l'ordre de 1'000 unités est nécessaire pour obtenir des résultats raisonnables (Phipps, 1994). Nous retenons tout de même les 6 variables sélectionnées comme variables divisives. Parmi elles, 4 sont des variables agricoles (« Vache/SAU-TO », « Maïs/SAU », « Vache/SAU » et « SubventionAF/SAU »), l'une décrit l'occupation du sol (« SAU/SC »), et la dernière décrit le climat (« Jours T>5°C »). L'indice de lièvres est lié à des combinaisons de ces variables, qui forment des règles dont l'interprétation intuitive n'est pas immédiate. Par exemple, si le nombre de vaches laitières est important, si la part cultures en maïs est peu importante, et si le nombre de jours avec T>5°C est peu élevé, alors l'indice de lièvres est petit, ceci avec une probabilité de $19/19=1$ (voir 6.2.2.1).
- Enfin, Pfister et al. (2002) présentent une régression multiple en plusieurs étapes entre les populations de lièvres et les éléments paysagers des zones de comptages de lièvres, qui fait ressortir de façon prépondérante la surface de champs continue, à laquelle correspond dans une certaine mesure « SAU/SC », puis différents éléments du paysage, que nous traduisons par « Relief », « Route&rail/SC », « Sol défavorable » et « Pluie10 ». Elle est complétée par des entretiens avec les chasseurs selon lesquels « Tracteur/SAU » est la deuxième cause de diminution de population de lièvres, après la diminution de la diversité du paysage. Rappelons que cette analyse est fondamentalement différente de la nôtre, car elle est basée sur une méthode différente : des comptages de lièvres, effectués entre 1991 et 2000, sur des zones de comptages qui sont des unités écologiques favorables au lièvre.

Mais ces conclusions ne résultent que de l'analyse de l'état dans les années '80. Dans une prochaine étape, notre recherche doit être étendue à l'ensemble de la période d'étude afin de répondre à la question posée par l'objectif C.

Perspectives

1. La méthode Pegase mériterait qu'on s'y attarde pour tenter d'aboutir à un meilleur résultat, plus fiable, parce qu'elle offre différents avantages : elle est en théorie tout à fait adéquate pour analyser ce type de base de données comprenant des variables continues, nominales et ordonnées ; elle utilise un formalisme simple et aboutit à un résultat intuitivement interprétable, un ensemble de règles probabiliste ; elle est basée sur une théorie solide, la théorie de l'information.

Mais pour rendre le résultat plus fiable, il est indispensable d'agrandir la base de données en calculant un « indice » représentatif des populations de lièvres sur les 936 communes de notre échantillon, ce qui nous permettrait d'utiliser Pegase dans son domaine de fonctionnement optimal. Le calcul d'un tel « indice », vu le peu de données à disposition, pourrait faire l'objet d'une recherche en soi.

2. Cette analyse de la base de donnée « Lièvre » repose sur des hypothèses de travail qui impliquent des limites au niveau de la représentativité des résultats. Il nous semble essentiel de poursuivre cette recherche dans les directions ouvertes par les questions suivantes :

- La population réelle de lièvre est-elle bien liée au nombre de lièvres tirés à la chasse ? Cette relation montre une certaine incertitude lorsqu'il ne s'agit pas d'une longue période et de grandes surfaces (Pfister et al., 2002) et c'est là probablement la plus grande source d'erreur dans cette recherche, parce que seuls les nombres de lièvres tirés sur les zones affermées couvrant 125 communes, pendant 6 ans, sont pris en compte. En admettant cette relation, il reste comme questions ouvertes :
- D'autres variables devraient-elles être incluses dans la base de données « Paysage » pour tenir compte d'un plus large éventail de facteurs qui pourraient influencer les populations de lièvres, tels la prédation, les maladies et les empoisonnements ? L'intégration de ces facteurs dans notre base de données actuelle nécessiterait un grand effort de récolte de données. On pourrait imaginer récolter des informations de type statistique concernant les populations d'autres espèces animales, prédateurs des lièvres, ou concernant les lièvres trouvés morts. La maladie pourrait être introduite par une variable dérivant d'autres informations, car elle ne devient importante, selon l'Office national de la chasse (1995), que dans des cas ponctuels, dépendant des conditions locales et du moment.
- La commune est-elle l'unité spatiale appropriée pour modéliser le nombre de lièvres tirés, sachant que les populations de lièvres utilisent l'espace sans se préoccuper de ces limites politiques ?
- Est-il judicieux de calculer l'indice d'abondance de lièvres comme nous l'avons fait, c'est-à-dire comme étant le nombre de lièvres tirés par surface communale totale, sachant que le lièvre n'utilise probablement pas toutes les zones d'un territoire communal (par exemple les zones urbaines, les surfaces de transports ou les plans d'eau) ? Ceci permet de tenir compte de l'influence des zones où le lièvre ne s'aventure pas ou peu, en particulier l'influence sur le voisinage des zones urbaines et des surfaces de transports. Ceci ne serait pas possible en calculant cet indice comme étant le nombre de lièvres tirés par surface d'habitat potentiel réel (probablement une partie seulement de la surface agricole utile, additionnée des forêts, des zones incultes, des zones urbaines peu denses ou non construites). Par contre, cette dernière approche permettrait d'obtenir des indices de lièvres qui ressemblent plus à ceux calculés par Schäfers (1996), en Allemagne, par exemple, et éventuellement d'estimer la population avec plus de réalisme. Notre base de données « Paysage » ne contient pas les informations nécessaires pour calculer cette surface d'habitat potentiel réel. Il serait nécessaire de connaître la part de la SAU inaccessible aux lièvres (par exemple les surfaces de cultures sous

plastiques ou les pépinières clôturées), les surfaces incultes, les surfaces d'espaces verts et lieux de détente (par exemple les terrains de golf), les cours et surfaces entre les bâtiments agricoles recensées comme zones urbaines.

Objectif B :

Quelles dynamiques observe-t-on pour les variables clés ? Ces évolutions sont-elles régulières sur la période d'étude ou montrent-elles des signes d'accélération ou de ralentissement ? Sont-elles uniformes dans la zone d'étude ? Est-il possible d'identifier des groupes de communes qui présentent des dynamiques semblables ? (→ Chapitres 5 et 7)

Les phénomènes d'évolution du paysage essentiels, mis en évidence par les dynamiques des variables clés

Les dynamiques des variables clés pour le lièvre, résumées par les évolutions de leurs valeurs moyennes sur les 936 communes, sur les années '50, '60, '70, '80 et '90, sont révélatrices de phénomènes essentiels lorsqu'on parle d'évolution du paysage :

- Utilisation du sol : diminution de la SAU, en grande partie due au développement des surfaces construites (zones urbaines et réseaux de transports).
- Pratiques agricoles : intensification des pratiques agricoles : mécanisation (augmentation du nombre de tracteurs, diminution de la main-d'œuvre agricole), augmentation de la taille des parcelles, changement de type de cultures (augmentation de la part relative de maïs, diminution du nombre de vaches laitières depuis les années '70).
- Climat : augmentation de la pluviométrie.
- Urbanisation : augmentation du trafic privé. On constate également un net développement du caractère urbain des communes. Cette caractéristique correspond à la première composante de notre Analyse en Composantes Principales (ACP, voir 5.2.2), identifiée comme étant une combinaison des variables urbaines « Bâtiment », « Population », « RouteEtRail », « Voiture » et « Zone urbaine », et sépare les communes de type urbain, c'est-à-dire appartenant à une agglomération, aux communes de type rural. L'évolution de cette caractéristique n'est pas uniforme sur la zone d'étude entre '50 et '60 : les communes appartenant à une agglomération évoluent en moyenne plus rapidement en direction de l'urbain que les communes n'appartenant pas à une agglomération. A partir des années '80, par contre, il n'y a donc plus de différence entre les communes urbaines et rurales, en terme de vitesse d'urbanisation : ces deux sous-échantillons de communes évoluent en moyenne de façon parallèle, en direction de l'urbain.

Remarquons qu'aucune de ces dynamiques n'est linéaire, révélant probablement que l'importance relative de ces phénomènes diffère d'une époque à l'autre.

L'agglomération, une entité forte de regroupements des communes

On constate, sur les cartes de distributions spatiales, que les communes de type urbain, selon l'ACP ci-dessus, se regroupent effectivement dans les agglomérations. Les évolutions des variables urbaines, entre '50 et '90, sont en général plus marquées dans les communes appartenant à une agglomération que dans les autres communes, avec des valeurs extrêmes d'évolution pour les communes-centres. L'évolution de la population entre '50 et '90 est un peu particulière. Elle est essentiellement la conséquence de flux migratoires : les communes rurales ainsi que les communes-centres se dépeuplent, au profit des communes périphériques des agglomérations. Concernant l'évolution entre '50 et '90 des variables non-urbaines, les cartes de leurs distributions spatiales ne montrent pas de regroupements orientés autour d'une caractéristique qualitative des communes. En particulier, la SAU et les forêts évoluent de façon dispersée dans notre zone d'étude.

Perspectives

3. Il serait intéressant d'approfondir la recherche de la structure des communes, connaissant leur degré d'urbanisation. Pour cela, il s'agirait de mener deux ACP distinctes, l'une sur les communes urbaines (appartenant à une agglomération), l'autre sur les communes rurales (n'appartenant pas à une agglomération).
4. La recherche de regroupement de communes, présentant des états ou des dynamiques similaires, pourrait être approfondie par une analyse de la distribution des valeurs et des dynamiques par ensembles géographiques : par canton, par zones (Jura, Plateau, Préalpes), par régions morphologiques (en fonction de l'altitude, de la pente), etc. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer une analyse quantitative, alors que nous nous sommes arrêtés ici à la description « visuelle » de nos cartes de distributions spatiales.

Objectif C :

La régression des populations de lièvres constatée depuis la fin des années '50 est-elle effectivement à mettre en relation avec l'évolution du paysage entre les années '50 et '90, telle qu'elle est décrite avec nos variables clés ? (→ Chapitres 6 et 7)

Dégradation de l'habitat potentiel du lièvre

En considérant l'effet présumé de chaque variable clé sur les populations de lièvres et, en parallèle, l'évolution de ces mêmes variables sur les 936 communes, notre étude met en évidence une nette dégradation de l'habitat potentiel du lièvre :

La diminution de la SAU a, peu à peu, exercé une pression sur l'habitat potentiel du lièvre. Les surfaces cultivées en maïs ainsi que les tailles des parcelles ont fortement augmenté, en même temps que le nombre de tracteurs a augmenté et celui de la main-d'œuvre diminué. Ces modifications sont des reflets de l'intensification des pratiques agricoles, causes de diminution importante de la qualité de l'habitat du lièvre. En même temps, les réseaux de routes et voies de chemin de fer se sont développés, réduisant l'habitat du lièvre, et, surtout, fragmentant de plus en plus le paysage, morcelant son habitat, et créant des barrières souvent infranchissables pour l'animal. L'accroissement du nombre de voitures a été extrêmement rapide, entraînant un nombre toujours plus important de lièvres tués chaque année sur les routes. Il est probable que l'augmentation de la pluviométrie, bien que peu significative, ne facilite pas la situation pour le lièvre, qui n'apprécie guère les champs trop humides.

Mais ce constat, issu d'analyses menées dans des conditions particulières, ne peut pas être généralisé. En effet, la relation entre le lièvre et le paysage est analysée pour la période correspondant aux années '80 uniquement. De plus, la dynamique des variables clés est décrite uniquement au travers de l'évolution de leurs valeurs moyennes sur les 936 communes.

Perspectives

5. Il s'agirait maintenant d'étendre ce constat à l'ensemble de la période d'étude ('50 à '90) et de porter plus d'attention aux différences régionales. Pour cela, deux options sont possibles :

- a) Observer la relation entre la dynamique de l'indice de lièvres et la dynamique du paysage, sur quelques communes choisies, pour lesquelles l'indice de lièvres peut être calculé à partir des données de la chasse affermée.

Rappelons que, pour notre recherche, nous avons identifié les années '80 comme étant la période la plus adéquate en terme de qualité et de quantité des données de la chasse affermée, et qu'un indice de lièvres a été calculé pour 125 communes. Dès lors, il est probable que le nombre de communes qu'il serait possible d'utiliser aux autres décennies n'est pas suffisant pour appliquer des méthodes d'analyses statistiques et Pegase. Nous proposons donc d'observer la dynamique de l'indice de lièvres sur des communes choisies, dont certaines variables « Paysage » (les variables clés pour le lièvre), présentent des dynamiques particulièrement caractéristiques : par exemple, une commune dont le nombre de tracteurs croît très rapidement, ainsi que, pour comparaison, une commune dont le nombre de tracteurs reste stable ou même décroît. Il serait également intéressant d'observer les relations entre les dynamiques de communes choisies dans différents ensemble géographiques, comme dans notre Perspective n°4.

- b) Calculer un indice de lièvre sur un nombre relativement important de communes (au minimum 125, idéalement près de 1'000), en '50, '60, '70, 80 et '90, ce qui permettrait d'effectuer les mêmes analyses que dans le chapitre 6 (méthodes d'études de dépendances, méthode d'analyse Pegase), à chaque décennie.

Ceci nécessite l'emploi de méthodes visant à construire les séries temporelles d'indice de lièvres sur chaque commune, entre '50 et '90, à partir des rares données à disposition.

Objectif D :

Est-il possible de déduire un scénario d'évolution du paysage, pour ces prochaines années, à partir des tendances d'évolution observées sur nos variables clés ? Comment les populations de lièvres réagiraient-elles à un tel scénario ? (→ Chapitre 7)

Pour le futur, encore de l'urbanisation et des pratiques agricoles intensives

L'observation de l'évolution des variables clés pour le lièvre entre '50 et '90 nous a permis de définir un scénario (A) d'évolution du paysage pour les années à venir, selon lequel les tendances observées sur la période d'étude se poursuivent au-delà des années '90. Ce scénario se résume ainsi : une lente diminution de la SAU, une forte augmentation des surfaces de routes et voies de chemin de fer, un accroissement du nombre de voitures extrêmement rapide, une stabilisation des surfaces cultivées en maïs, une diminution des subventions AF, une légère augmentation de la pluviométrie et une certaine augmentation de la mécanisation des pratiques agricoles, révélée par l'agrandissement des parcelles, la diminution de la main-d'œuvre et une certaine augmentation du nombre de tracteurs, allant en se stabilisant. Ce scénario correspond à la situation où la gestion des différents domaines ayant une influence sur le paysage ne serait pas adaptée en fonction des nouveaux besoins.

Pour tenir compte de ce dernier point, un deuxième scénario (B) a été défini, sur la base des tendances pour le futur annoncées dans 3 rapports liés à la réforme agricole et à l'aménagement du territoire (OFAG, 2000 ; Biéler, 2001 ; OFS, 2001). Bien que peu différent du scénario (A), il amène quelques nuances, du fait que les tendances exprimées proviennent, en partie, de la volonté de modifier l'évolution actuelle par l'adoption de mesures et de lois. En particulier, ce scénario annonce un ralentissement de l'augmentation du réseau de transports, une diminution des surfaces cultivées en maïs, une forte augmentation du nombre de tracteurs, une apparition des paiements directs pour des surfaces de compensation écologiques, et surtout le changement de définition des subventions AF : elles ne servent plus uniquement à la construction de nouveaux ouvrages, mais également à l'entretien des ouvrages existants et éventuellement à l'entretien des éléments écologiques.

Pour le futur, des conditions difficiles pour les populations de lièvres

Combinés avec les liens entre le lièvre et les variables clés identifiés précédemment (voir ci-dessus, Objectif A), les deux scénarios mènent à un bilan probablement défavorable pour le lièvre : les évolutions de 6 variables clés (parmi 11 intégrées dans les 2 scénarios) entraîneraient des conséquences négatives sur le développement des populations de lièvres. Ces dernières sont révélatrices des causes de régression du lièvre avancées par les experts du lièvre (Pfister et al., 2002) :

- l'augmentation de la taille des parcelles et l'augmentation de la densité de tracteurs, révélatrices de l'intensification des pratiques agricoles,
- la diminution de la SAU un signe du développement de l'urbanisation par l'extension des zones urbaines et des réseaux de transports,
- l'augmentation de la densité de voitures, ainsi que celle des routes et rail, conduisant à l'extension des réseaux de transports,
- la légère augmentation de la pluviométrie, annonciatrice du développement de conditions naturelles climatiques un peu plus défavorables pour le lièvre.

Perspectives

6. Admettons qu'il soit possible de connaître la relation entre le lièvre et le paysage durant l'ensemble de la période d'étude ('50 à '90), comme nous le proposons ci-dessus (voir Objectif C). Il serait alors intéressant d'appliquer ces nouvelles connaissances sur les réactions des populations de lièvres, sur nos scénarios d'évolution du paysage.

Objectif E :

La méthode quantitative descriptive de la dynamique du paysage, développée dans l'ensemble de ce projet de recherche, peut-elle servir de plate-forme méthodologique pour un suivi de l'état socio-économique et écologique du paysage et de sa capacité d'accueil pour le lièvre?(→ Chapitres 4, 5 et 7)

Notre méthode adéquate pour un suivi à large échelle, mais encore à affiner

La stratégie adoptée dans cette recherche permet d'allier un suivi à une large échelle spatiale de l'état du paysage, avec l'objectif de permettre le développement sain d'une espèce animale, reconnue comme un bon indicateur de l'état du paysage par Pfister et al. (2002). Notre recherche montre qu'il est possible de reproduire les grands facteurs de dynamique du paysage à l'aide de 16 variables,

identifiées parmi un jeu initial de 40 facteurs, comme étant des variables clés pour le lièvre, à l'aide de différentes méthodes d'analyses complémentaires portant sur les années '80.

Remarquons tout de même que nous avons souvent mentionné d'autres facteurs, représentant des éléments marquants et des forces agissantes importantes, pour expliquer les liens entre les éléments, les phénomènes ou les évolutions, en particulier « Terre ouverte » et « Population ». En effet, les 40 variables de la base de données « Paysage » sont probablement, dans une mesure non-négligeable, liées entre elles de façon complexe. Notre conclusion est qu'il est difficile de parler d'évolution du paysage sans mentionner le développement des différents types de cultures et de la démographie ou des mouvements de population.

L'état du paysage, ainsi que sa capacité d'accueil pour le lièvre, pourront être suivis dans le futur à l'aide de ces variables clés, qui, étant issues essentiellement de statistiques communales, seront probablement toujours disponibles dans le futur.

Perspectives

7. Notre recherche donne les bases à la mise en place d'une plate-forme méthodologique pour un suivi, communes par communes, du paysage et de certaines espèces animales, indicatrices de phénomènes révélateurs des conséquences de la gestion du territoire et des ressources. Il s'agit maintenant de développer cette plate-forme ainsi qu'un protocole de récolte des données et de contrôle des résultats des différentes mesures prises en faveur de ces espèces animales.
8. Il est important de compléter cette recherche par une analyse de la structure du paysage, à une échelle plus fine, en se focalisant sur un petit nombre de communes. En effet, notre recherche permet de connaître une partie de la structure seulement : la composition des communes, par le biais du nombre (ou surface relative) de chaque élément. Mais la configuration de ces éléments à l'intérieur de chaque commune reste encore inconnue, et l'aspect qualitatif des variables n'est pas non plus intégré dans notre base de donnée. Or, ce type d'information est essentiel pour parler, par exemple, de fragmentation du paysage par des éléments urbains (les routes, les zones urbaines), de corridors pour la faune (les haies, les lisières étagées), ou encore de l'effet des bandes herbeuses le long des champs et des routes. Pour cela, il s'agirait de relever la position et différentes caractéristiques des éléments du paysage sur une surface limitée, à l'aide de photos aériennes, de cartes, de relevés sur le terrain, et de rencontres avec les agriculteurs et autres gestionnaires du territoire. L'utilisation d'un SIG permet ensuite de gérer ces informations et d'analyser la structure du paysage. Remarquons que l'analyse du paysage par des études successives à différents niveaux de détails est une démarche qui a déjà été utilisée avec succès par différents auteurs, tel Turner & Ruscher (1988) aux Etats-Unis ou encore Skanes & Bunce (1996) en Suède.

Objectif F :

De façon générale, sans tenir compte de la problématique du lièvre, les données provenant des statistiques communales permettent-elles de décrire le paysage de la partie Nord-Ouest de la Suisse, dans ses aspects « Utilisation du sol », « Pratiques agricoles », « Urbanisation », « Climat », « Morphologie » et « Géographie » ? Sont-elles appropriées à une étude rétrospective ? Sont-elles comparables d'une décennie à l'autre, et donc utilisables pour décrire la dynamique réelle ? Les différentes méthodes utilisées (méthodes statistiques descriptives, ACP, corrélations) sont-elles appropriées pour analyser ces données ? (→ Chapitres 4, 5 et 7)

Les 40 variables qui ont été récoltées permettent de décrire l'utilisation du sol, les pratiques agricoles, les conditions climatiques, la morphologie et la géographie des 936 communes. Cette base de données « Paysage » contient un large éventail de variables, qui couvrent différents domaines concernés lorsqu'il s'agit de reproduire et analyser les tendances de la dynamique du paysage. Les valeurs sont très proches de la réalité, mais l'utilisateur de cette base de données doit être conscient de ses limites d'utilisation, c'est-à-dire des estimations qui ont été faites et de la signification des variables. En particulier, les valeurs des années 1950, 60 et 70 des variables « Forêt », « Route&rail » et « Zone urbaine » doivent être comparées avec prudence avec les valeurs des années 1980 et 90, car les méthodes de saisie ne sont pas comparables : les premières proviennent de recensements de l'OFS (Bureau fédéral de statistique, 1953 ; Bureau fédéral de statistique, 1972), les secondes ont été extraites de la Statistique de la superficie de l'OFS, distribuée sous forme SIG par le service GEOSTAT de l'OFS (OFS, 1993).

Les méthodes statistiques descriptives et l'analyse en composantes principales (ACP) se sont révélées être adéquates pour étudier le contenu et la qualité de cette base de données « Paysage ». Ceci nous a permis de comparer ces données aux différentes décennies, pour notre étude rétrospective du paysage.

Ces données, provenant essentiellement de statistiques communales, se sont révélées être adéquates pour un suivi à une large échelle spatiale de l'état du paysage à travers sa composition. Notre recherche gagnerait à être complétée par une étude de la configuration du paysage, pour nous donner sa structure (voir Perspective n°8).

8.2 Que conclure de cette recherche ?

L'apport essentiel de cette recherche est d'avoir démontré qu'il est possible de décrire l'état du paysage de la partie Nord-Ouest de la Suisse et son évolution entre les années '50 et '90, tels qu'ils sont perçus par le lièvre. Cette description est basée essentiellement sur des données statistiques communales, et sur des facteurs descriptifs du paysage en rapport avec le lièvre.

Cette recherche a permis de confirmer les affirmations des experts du lièvre concernant les besoins du lièvre, en identifiant les facteurs clés du paysage pour cet animal, ainsi que les relations entre l'état du paysage correspondant aux années '80 et celui des populations de lièvres.

Les données récoltées nous ont permis d'effectuer une analyse rétrospective du paysage, d'en tirer les tendances essentielles entre '50 et '90, et finalement de construire deux scénarios d'évolution du paysage pour les années à venir. Ces deux scénarios mènent à une situation probablement critique pour le lièvre.

Cette espèce animale ayant été reconnue comme un bon indicateur de l'état du paysage par Pfister et al. (2002), nous recommandons de tenir compte des besoins de cette espèce animale dans la gestion future du territoire. Selon nos résultats, il est essentiel : 1. D'encourager des pratiques agricoles extensives ; 2. De freiner, voir arrêter l'extension des zones urbaines et des réseaux de transports ; 3. De réduire le trafic motorisé. Comme ces deux dernières recommandations semblent quelque peu irréalisables dans un futur proche, nous proposons de densifier le réseau de structures favorables pour le lièvre, tel les bandes herbeuses, les friches, et autres surfaces proches de l'état naturel, voire de créer des zones de protection pour le lièvre.

Nous proposons de développer, sur la base des résultats de cette recherche, une plate-forme méthodologique pour un suivi du paysage et de certaines espèces animales, indicatrices de phénomènes révélateurs des conséquences de la gestion du territoire et des ressources. Il s'agit d'élaborer un dispositif d'observation qui inclut un protocole de récolte des données menant à une base de données adéquate, et qui permet de contrôler les résultats des différentes mesures prises en faveur de ces espèces animales.

Ces mesures permettront d'assurer le développement sain de la population du lièvre, et par la même occasion, un développement durable de nos ressources et du patrimoine.

Références bibliographiques

- Agger, P. & Brandt, J.** (1988). Dynamics of small biotopes in Danish agricultural landscape. *Landscape Ecology*, Vol. 1, 227-240.
- Amstutz, M., Dick, M., & Hufschmid, N.** (1992). *La nature aux mains des paysans, Aménagement du territoire agricole*, Berne.
- AT** (2000). Des villes suisses attractives et compétitives. *Bulletin AT*, 29-34.
- Baeriswyl, P.-A., Rebetez, M., Winistörfer, A., & Roten, M.** (1997). Repartition spatiale des modifications climatiques dans le domaine alpin, VDF, Zurich.
- Baker, W.L.** (1989). A review of models of landscape change. *Landscape Ecology*, vol. 2, 111-133.
- Baudry, J. & Burel, F.** (1985). Système écologique, espace et théorie de l'information. In *Paysage et système*, Vol. 55, pp. 87-102, Ottawa.
- Baudry, J., Laurent, C., Thenail, C., Denis, D., & Burel, F.** (1999). Driving factors of land-use diversity and landscape patterns at multiple scales - A case study in Normandy, France. In *Land-use changes and their environmental impact in rural areas in Europe* (ed J.B. R. Krönert, I.R. Bowler, A. Reenberg), Vol. 24, pp. 103-119. UNESCO and The Parthenon Publishing Group.
- Biéler, P.** (2001). *Constructions hors zone à bâtir, Avant-projet de modification de la loi vaudoise, Rapport explicatif*.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Ohlsen, R.A., & Stone, C.J.** (1984). *Classification and regression trees* Wadsworth and Brooks, Monterey, California, USA.
- Bresinski, W.** (1976). Agrarian structure vs. the European hare population density. *Ecology and management of European hare population*, 195-197.
- Broggi, M.F. & Schlegel, H.** (1990). Minimum requis de surfaces proches de l'état naturel dans le paysage rural, Rep. No. rapport 31a du Programme national de recherche "Sol", Liebefeld-Berne.
- Broggi, M.F. & Schlegel, H.** (1998). *Priorités nationales de la compensation écologique dans les zones agricoles de plaine en Suisse*, Berne.

- Bureau fédéral de statistique** (1953). Statistique de la superficie de la Suisse 1952, Berne.
- Bureau fédéral de statistique** (1959). Utilisation du sol en Suisse, 1955, Recensement fédéral des entreprises, Berne.
- Bureau fédéral de statistique** (1972). Statistique de la superficie de la Suisse 1972, Berne.
- Bureau fédéral de statistique** (1976). Utilisation du sol, Recensement fédéral des entreprises, 1975, Agriculture, Berne.
- Bureau fédéral de statistique** (1981). Recensement fédéral de l'agriculture et de l'horticulture 1980, Principaux résultats par communes, Berne.
- Burel, F. & Baudry, J.** (1990). Structural dynamic of a hedgerow network landscape in Brittany France. *Landscape Ecology*, 4, 197-210.
- Burel, F. & Baudry, J.** (1999). *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*, TEC&DOC edn.
- Coquillard, P. & Hill, D.R.C.** (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes, des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, Masson edn., Paris.
- Davis, F.W. & Dozier, J.** (1990). Information analysis of a spatial database for ecological land use classification. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 56, 605-613.
- de Pablo, C.L., Martin de Agar, P., Gomez Sal, A., & Pineda, F.D.** (1988). Descriptive capacity and indicative value of territorial variables in ecological cartography. *Landscape Ecology*, 1, 203-211.
- Dumanski, J., Phipps, M., & Huffman, E.** (1987). A study of relationships between soil survey data and agricultural land use using information theory. *Can. J. Soil Sci.*, 67, 95-102.
- Eiberle, K. & Matter, J.-F.** (1982). Ergebnisse einer Streckenanalyse beim Feldhasen. *Z. Jagdwiss.*, 28, 178-193.
- Engelhardt, W., Obergruber, R., & Reicholf, J.** (1985). Lebensbedingungen des europäischen Feldhasen (*Lepus europaeus*) in der Kulturlandschaft und ihre Wirkungen auf Physiologie und Verhalten. *Berichten der Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege*, Beiheft 5.
- Ewald, K.C.** (1978). Der Landschaftswandel. Zur Veränderung schweizerischer Kulturlandschaften im 20. Jahrhundert. In *Tätigkeitsbericht der Naturforschenden Gesellschaft Baselland*, Vol. Band 30, pp. 56-299, Liestal.
- Farina, A.** (1998). *Principles and methods in landscape ecology* Chapman & Hall.
- Fjellstad, W.J. & Dramstad, W.E.** (1999). Patterns of changes in two contrasting Norwegian agricultural landscapes. *Landscape and urban planning*, 45, 177-191.
- Flamm, R.O. & Turner, M.G.** (1994). Alternative model formulation for a stochastic simulation of landscape change. *Landscape Ecology*, 9, 37-46.
- Forman, R.T.T.** (1990). The beginnings of landscape ecology in America. In *Changing landscapes: an ecological perspective* (ed I.S.Z.a.R.T.T. Forman), pp. 35-41.
- Forman, R.T.T.** (1995). *Land mosaics, The ecology of landscapes and regions*, Cambridge edn.
- Forman, R.T.T. & Godron, M.** (1986). *Landscape Ecology*, John Wiley & Sons, Inc. edn.
- Fraguglione** (1975). La régression du lièvre commun en Europe Occidentale. XII congresso da uniao internacional dos biologistas da caca, 95-109.
- Frei, C., Davies, H.C., Gurtz, J., & Schär, C.** (2001). Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in Central Europe. *Integrated Assessment*, 281-299.
- Frylestam, B.** (1976). Effects of cattle-grazing and harvesting of hay on density and distribution of an European hare population. In *Ecology and management of European hare population*, pp. 199-203, Warszawa.
- Gardner, R.H. & Turner, M.G.** (1991). Future Directions in Quantitative Landscape Ecology. In *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, pp. 519-525. Springer-Verlag New York, Inc.
- Gilliéron, C.** (1999). *Inventaire des éléments significatifs pour le lièvre dans le paysage agricole du Plateau suisse. Rapport interne*. EPFL.

- Glenz, C.** (in press). Landscape - from painting to science or from aesthetics to ecocomplex. *Journal of landscape ecology*.
- Haller, R., Hess, M., & Allgöwer, B.** (1997). Untersuchung über die Verbreitung des Feldhasen mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems in den Gebieten Wauwiler Moos und Klettgau. Geographisches Institut der Universität Zürich, im Auftrag der Schweizerischen Vogelwarte Sempach, Zürich.
- Hausser, J.** (1995). *Mammifères de la Suisse: Répartition, Biologie, Ecologie* Birkhäuser Verlag.
- Herrmann, U.** (1997). *Idées spécifiques pour la nature et le paysage*, Berne.
- Hills, G.A.** (1974). A philosophical approach to landscape planning. *Landscape planning*, 1, 339-371.
- Ihse, M.** (1995). Swedish agricultural landscapes - patterns and changes during the last 50 years, studies by aerial photos. *Landscape and urban planning*, 31, 21-37.
- Iorgulescu, I.** (2000). Fiche d'enseignement 4. Paysage en tant qu'écosystème: Définition, types, caractéristiques, fonctionnement et fonctions. GECOS, DGR, EPFL., Lausanne.
- ISM** Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt.
- Jans, P.** (1996). Répercussions des mutations structurelles de l'agriculture sur la nature et le paysage. *Bulletin AT*, 3-4, 35-36.
- Johnson, L.B.** (1990). Analyzing spatial and temporal phenomena using geographical information systems, A review of Ecological Applications. *Landscape Ecology*, 4, 31-43.
- Kienast, F.** (1993). Analysis of historic landscape patterns with a Geographical Information System - a methodological outline. *Landscape Ecology*, 8, 103-118.
- Kipfler, W.** (1988). *Die schweizerische Landwirtschaft, Bilder, Zahlen, Kommentare*.
- Küng, C.** (2001). Transports et organisation du territoire: le point de vue des transports. *Bulletin AT*, 37-38.
- Laforge, H.** (1981). *Analyse multivariée, Etudes Vivantes* edn.
- Lee, R.G., Flamm, R., Turner, M.G., Bledsoe, C., Chandler, P., DeFerrari, C., Gottfried, R., Naiman, R.J., Schumaker, N., & Wear, D.** (1992). Integrating sustainable development and environmental vitality: a landscape ecology approach. In *Watershed management: Balancing sustainability and environmental change* (ed R.J. Naiman), pp. 499-521. Springer-Verlag.
- Lindström, E., Andrèn, H., Angelstam, P., & Widèn, P.** (1986). Influence of predators on Hare population in Sweden: a critical review. *Mammal Review*, 16, 151-156.
- Mahrer, F.** (1988). Inventaire forestier national suisse, Résultats du premier inventaire 1982-1986 Institut fédéral de recherches forestières à Birmensdorf.
- Mankin, P.C. & Warner, R.E.** (1999). A regional model of the eastern cottontail and landuse changes in Illinois. *J. Wildl. Manage.*, 63, 956-963.
- Marboutin, E. & Peroux, R.** (1991). Au fil des ans...les variations des tableaux de lièvres. *Chasseurs de l'est*, 4-6.
- Marti, P. & Henz, H.-R.** (2001). Transports et organisation du territoire: la poule et l'oeuf ou l'oeuf et la poule? *Bulletin AT*, 33-36.
- McGarigal, K. & Marks, B.J.** (1995). FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure, Rep. No. PNW-GTR-351. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Meia, J.-S., Meyer, S., & Aubry, S.** Renards et lièvres dans le Jura suisse: ignorance réciproque. Université de Neuchâtel, Institut de zoologie.
- Meriggi, A. & Alieri, R.** (1987). The influence of environmental variables on the density of hares in protected areas of North Italy. Global trends in wildlife management, Trans 18th IUGB Congress, Krakow 1987, 115-118.
- Miserez, J.-L.** (1999). Régionalisation et généralisation cartographique des données de la statistique de superficie. EPFL, Lausanne.

- Nyenhuis, H.** (1998). Verteilung und Dichte des Feldhasen (*Lepus europaeus* P.) analysiert nach dem Einfluss der Bodennutzung in Nordwestdeutschland. Allg. Forst-u.J.-Ztg., 170.Jg, 28-33.
- OFAG** (2000). Horizon 2010, Stratégie pour le développement de la politique agricole. Office fédéral de l'agriculture, Berne.
- OFAG** (2001a). Evaluation des mesures écologiques et des programmes de garde d'animaux, Résumé portant sur tous les domaines, Quatrième rapport intermédiaire. Office fédéral de l'agriculture, Berne.
- OFAG** (2001b). Rapport agricole 2001. Office fédéral de l'agriculture, Berne.
- OFEFP** (1994). Listes rouges des espèces animales menacées de Suisse. Office Fédéral de l'Environnement, Forêt et Paysage, Berne.
- OFEFP** (1998). Le paysage entre hier et demain, Berne.
- OFEFP, OFC, SHGN, OFAT, & DDPS** (1999). Conception "Paysage suisse", Berne.
- Office national de la chasse** (1995). Spécial lièvre d'Europe. Bulletin mensuel de l'Office national de la chasse, 204, 96.
- OFS** (1991). Comptage suisse de la circulation routière, 1990. In. Office fédéral de la statistique, Berne.
- OFS** (1992). Recensement fédéral de l'agriculture et de l'horticulture 1990, Exploitations agricoles par commune, Office Fédéral de la Statistique, Berne.
- OFS** (1993). GEOSTAT Manuel de l'utilisateur. Office Fédéral de la Statistique, Berne.
- OFS** (1994). GEOSTAT, Le service fédéral des données spatiales, Berne.
- OFS** (1996). Statistique suisse de la superficie. L'utilisation du sol dans les cantons. Office Fédéral de la Statistique, Berne.
- OFS** (1999). Reflets de l'agriculture suisse, Edition 1998, Office Fédéral de la Statistique, Neuchâtel.
- OFS** (2001). L'utilisation du sol: hier et aujourd'hui. Office Fédéral de la Statistique, Neuchâtel.
- OFS & OFEFP** (1997). L'environnement en Suisse 1997. Office Fédéral de la Statistique, Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
- Pépin, D.** (1973). Mise au point de techniques pour l'étude de populations de lièvres. In., pp. 77-119.
- Pfister, H.** (1989a). UVP Bahn 2000 (Mattstetten-Rothrist) und N5 (Raum Grenchen). Schweizerische Vogelwarte Sempach, Sempach.
- Pfister, H.** (1989b). UVP Bahn 2000: Wildpotential im Perimeter Neubaustrecke Mattstetten Rothrist. Schweizerische Vogelwarte Sempach, Sempach.
- Pfister, H.P.** (1984). Raum-zeitliche Verteilungsmuster von Feldhasen (*Lepus europaeus* Pallas) in einem Ackerbaugesbiet des Schweizerischen Mittellandes, Universität Zürich, Zürich.
- Pfister, H.P.** (1995). Die Feldhasen-Situation in der Schweiz.
- Pfister, H.P.** (1997). Feldhasen-Projekt Schweiz: Schlussbericht zuhanden BUWAL für die Projektphase 1994-96. Schweizerische Vogelwarte Sempach, Centre ornithologique suisse, Sempach.
- Pfister, H.P. & Birrer, S.** (1997). Landschaftsökologische und faunistische Erfolgskontrolle für ökologische Ausgleichsmassnahmen im Schweizer Mittelland. Mitteilung der Naturforschenden Gesellschaft Luzern, 35, 173-193.
- Pfister, H.P., Birrer, S., & Sieber, U.** (1998). Lebensraum für den Feldhasen. Schweizerische Vogelwarte Sempach, Sempach.
- Pfister, H.P., Kohli, L., Kästli, P., & Birrer, S.** (2002). Feldhase. Schlussbericht 1991-2000. Schriftenreihe Umwelt, BUWAL, Bern, 334, 150.
- Phipps, M.** Spatial analyses and information theory.
- Phipps, M.** (1969). Recherche sur la distribution géographique de l'utilisation du sol: structure locale, modèle biogéographique, structure régionale., Université de Toulouse, Toulouse.
- Phipps, M.** (1981). Entropy and community pattern analysis. J. theor. Biol., 93, 253-273.

- Phipps, M.** (1985). Théorie de l'information et problématique du paysage. *Paysage et système*, Revue de l'Université d'Ottawa, 55, 59-74.
- Phipps, M.** (1994). *Pegase operation manual*.
- Phipps, M.** (1995). Paysage écologique, système organisé et analyse de l'information. In *Méthodes et réalisations de l'écologie du paysage dans l'aménagement du territoire* (ed D.G.D.e.J. Falardeau), pp. 15-24. Polysciences Publications, Inc., Morin's Heights, Canada.
- Phipps, M., Baudry, J., & Burel, F.** (1986a). Dynamique de l'organisation écologique d'un paysage rural: Modalités de la désorganisation dans une zone péri-urbaine. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 303. Série III, 263-268.
- Phipps, M., Baudry, J., & Burel, F.** (1986b). Ordre topo-écologique dans un paysage rural: les niches paysagiques. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 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.
- Pielowski, Z.** (1996). *Berichte über den Feldhasen in Polen*.
- Quinlan, J.R.** (1987). Simplifying decision trees. *International Journal of Man-Machine Studies*, 221-234.
- Rakotomalala, R.** (1997). *Graphes d'induction*, Université Claude Bernard-Lyon1.
- Rebetez, M.** (1999). Twentieth century trends in droughts in southern Switzerland. *Geographical research letters*, 26, 755-758.
- Reenberg, A. & Baudry, J.** (1999). Land-use and landscape changes - The challenge of comparative analysis of rural areas in Europe. In *Land-use changes and their environmental impact in rural areas in Europe* (ed J.B. R. Krönert, I.R. Bowler, A. Reenberg), Vol. 24, pp. 23-41. UNESCO and The Parthenon Publishing Group.
- Rieder, P.** (1996). Mutations structurelles de l'agriculture. *Bulletin AT*, 3-4, 27-29.
- Salzmann-Wandeler, I.** (1976). Feldhasen-Abschusszahlen in der Schweiz. In *Ecology and management of European hare populations* (ed P.H. Association), pp. 35-40, Poznan.
- Schäfers, G.** (1996). Die Jagdstreckenentwicklung des Feldhasen von 1959 bis 1993 in der alten Bundesrepublik Deutschland in Abhängigkeit von der Landwirtschaftsstruktur. *Beiträge zur Jagd- und Wildforschung*, 21, 215-228.
- Schröpfer, R. & Nyenhuis, H.** (1982). L'importance de la structure du paysage pour la densité de population du lièvre. *Z. Jagdwiss.*, 28, 213-231.
- Schuler, M., Huissoud, T., Jemelin, C., & Stofer, S.** (1997). *Atlas structurel de la Suisse*, Verlag Neue Zürcher Zeitung edn. OFS.
- Secrétariat des paysans suisses** (1988). *Statistiques et évaluations concernant l'agriculture et l'alimentation*, Brugg.
- Sigmaplan/Metron/Metrotest** (1994). *Le paysage sous pression*, Berne.
- Skanes, H.** (1996). *Towards an integrated ecological-geographical landscape perspective. A review of principal concepts and methods*. Doctoral dissertation: paper I, Stockholm University, Sockholm.
- Skanes, H.M. & Bunce, R.G.H.** (1996a). *Directions of landscape change (1741-1993) in Virestad, Sweden - characterised by multivariate analysis*. Doctoral dissertation: paper IV, Stockholm University, Motala.
- Skanes, H.M. & Bunce, R.G.H.** (1996b). *Landscape change and grassland dynamics, retrospective studies based on areal photographs and old cadatral maps during 200 years in South Sweden*. titre général de la thèse en 4 papiers, Stockholm University, Motala.
- Sotoudeh, A.** (1998). Vers un tableau de bord pour une Suisse durable. *Environnement*, 36-37.
- SRVA** (1997). *Vocabulaire compensation écologique, nature et agriculture.*, SRVA edn., Lausanne.
- Thomas, L. & Kissling, J.-L.** (2001). PA 2007 : le point de vue de Prométerre (<http://www.prometerre.ch/Informations/Index.html?element=dossier>). Prométerre.

- Thompson, B. & Thompson, W.** (1986). Finding rules in data. BYTE.
- Turner, M.G.** (1987). Spatial simulation of landscape changer in Georgia: A comparison of 3 transition models. *Landscape Ecology*, 1, 29-36.
- Turner, M.G. & Gardner, R.H.** (1991). *Quantitative Methods in Landscape Ecology* Springer-Verlag New York, Inc.
- Turner, M.G. & Ruscher, C.L.** (1988). Changes in landscape patterns in Georgia, USA. *Landscape Ecology*, 1, 241-251.
- USP** (1996). *Statistiques et évaluations concernant l'agriculture et l'alimentation*. Union Suisse des Paysans, Brugg.
- Venables, W.N. & Ripley, B.D.** (1998). *Modern applied statistics with S-PLUS*, Second edition edn. Springer.
- WCED** (1987). *Our common future* Oxford University Press, Oxford.
- Wear, D.N., Turner, M.G., & Flamm, R.O.** (1996). Ecosystem management with multiple owners: Landscape dynamics in a southern appalachian watershed. *Ecological Applications*, 6, 1173-1188.
- Wegelin, F.** (1996). Aménagement du territoire et agriculture: vers un nouveau partenariat? *Bulletin AT*, 3-4, 40-43.
- Withers, M.A. & Meentemeyer, V.** (1999). Concepts of scale in landscape ecology. In *Landscape ecological analysis* (ed J.M.K.a.R.H. Gardner), pp. 205-252. Springer-Verlag.
- Wonnacott, T.H. & Wonnacott, R.J.** (1972). *Statistique Economie, gestion, sciences, médecine*, 4 ème édition edn. Economica.
- Zonnerveld, I.S.** (1990). Scope and concepts of landscape ecology as an emerging science. In *Changing landscapes: an ecological perspective* (ed I.S.Z.a.R.T.T. Froman), pp. 3-20.

Lexique et liste des abréviations

Agglomération	Ensemble de communes adjacentes, comprenant au total au moins 20'000 habitants, présentant souvent un lien morphologique (continuité du bâti) avec la zone-centrale formée d'une ou plusieurs communes-centre, et des rapports d'interdépendances fonctionnelles avec elle ainsi qu'une marque de l'urbain du point de vue économique et social. Une commune qui n'appartient pas à la zone-centrale doit remplir 3 parmi 5 conditions portant sur la continuité du bâti ou de la part de la population active et résidente.
Chorologique	L'aspect chorologique est donnée par un conglomérat d'unités d'attributs du sol ou de patrons de cartes, qui montrent l'hétérogénéité horizontale, le patron horizontal des éléments (unités de sol) mutuellement liés (Zonnerveld, 1990).
Classe	Catégorie
Couverture du sol	Résultat de conditions naturelles ainsi que des utilisations passées et présentes du sol ; souvent représentée par le type de couverture végétale.
Données GEOSTAT	Valeurs provenant de différentes sources, mais distribuées par le service GEOSTAT de l'OFS.
Force motrice	Traduction du terme anglais « Driving force »
Parcelle	Une parcelle est un terrain continu appartenant à une personne, et peut être cultivée en plusieurs champs de différentes cultures.
Patron	Traduction du terme anglais « pattern », selon (Burel & Baudry, 1999), décrivant l'arrangement spatial de la mosaïque et des réseaux.
Pegase	« Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique », méthode d'analyse développée par M. Phipps, Département de Géographie, Université d'Ottawa, Ottawa, Canada. Voir 6.1.2 et Annexes 6.2 et 6.3.
Surface proche de l'état naturel	Biotope qui se distingue des surfaces exploitées de façon intensive par une diversité plus grande des espèces et/ou par la présence d'espèces rares selon Broggi & Schlegel (1990). Selon le SRVA (1997), elle se distingue d'une zone naturelle par son caractère dépendant de l'influence humaine. Exemples : marais, prairie sèche riche en espèces, haie, bosquet, prairie extensive.
Tache	Traduction du terme anglais « patches », selon (Burel & Baudry, 1999), décrivant une unité fonctionnelle définie par sa taille, sa forme et sa nature, non-linéaire, relativement homogène et qui diffère des environs (Forman, 1995).
Trame de points	Points répartis régulièrement dans une grille, par exemple une grille hectométrique dans un SIG.
Utilisation du sol	Type de gestion en terme de pratiques socio-économiques, telles que pâture, fauche, foresterie, culture ouverte ; parfois difficile à reconnaître sur des cartes ou des photos aériennes.
Valeurs extrêmes	Traduction du terme anglais « outliers ». Unités à l'extérieur de l'intervalle [Min(0.7% ; 1.5*EIQ); Min(99.3% ;1.5*EIQ)], avec EIQ l'Etendue Inter-Quartile. (voir 5.1.1)
Variable cible	Variable à expliquer, variable dépendante, caractéristique dépendante
Variable divisive	Variable identifiée par Pegase comme étant celle parmi les variables explicatives qui, lorsque le sous-échantillon est divisé selon les classes de cette variable, permet la plus grande diminution d'entropie du système. (voir Annexe 6.2)

Variable explicative	Variables indépendantes, descripteurs du milieu dans un contexte écologique
Variable primaire	Les variables primaires sont formées des valeurs brutes tirées des documents sources.
Variable rapportée	Terme que nous utiliserons pour décrire une variable dérivée par rapport à une surface de référence. Ce terme « dérivé » prêtant à confusion avec la dérivée d'une fonction mathématique, nous préférons ne pas l'utiliser dans ce texte.
Zone de chasse affermée	Territoire loué par des chasseurs pendant plusieurs années, sur lequel ils sont les seuls, avec leurs invités, à pouvoir chasser. Cantons pratiquant la chasse par zones affermées : AG, BL, BS, LU, SG, SH, SO, TG, ZH. Traduction du terme allemand « Revier ». Les limites de ces territoires ne correspondent pas forcément à celles des communes. Par opposition avec la chasse avec permis (par cantons).
'50, '60, '70, '80, '90	Les décennies comprenant les années 1950à59, 1960à69, 1970à79, 1980à89 et 1990à99.
Δ 50-60, Δ 60-70, Δ 70-80, Δ 80-90	Les différences entre les valeurs '50 et '60, entre '60 et '70, entre '70 et '80 et entre '80 et '90.
ACP	Analyse en composantes principales
BIO	Production biologique
GEOSTAT	Service de l'Office Fédéral de la Statistique, qui propose une base de données de type SIG, contenant des données représentées par des points (p.ex. coordonnées des centres des communes), une trame de points (p.ex. utilisation du sol), une trame (p.ex. population par hectare), des lignes (p.ex. réseau hydrologique) ou des polygones (p.ex. limites des communes, lacs). Pour plus de détails, voir (OFS, 1993) et (OFS, 1994)
IALE	International Association for Landscape Ecology
LRI	Inventaire des biotopes, traduit du terme allemand « Lebensraum Inventar »
OFAG	Office fédéral de l'agriculture
OFAT	Office fédéral de l'aménagement du territoire
OFEFP	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
OFS	Office fédéral de la statistique
OFS/S+T	Office fédéral de la statistique/Office fédéral de topographie
OQE	Ordonnance sur la qualité écologique
PI	Production intégrée
SAU	Surface agricole utile
SAU-TO	Surface agricole utile non terre ouverte
SCE	Surface de compensation écologique
SIG	Système d'information géographique
TO	Terres ouvertes
TSS	Terminal sub set ou Sous-échantillon terminal

Annexes

Liste des annexes

- Annexe 4.1 : Changements de numérotation des communes et variations des surfaces communales
- Annexe 4.2 : Ajustement des relevés sur les cartes (1:50'000) aux données GEOSTAT de l'OFS : surfaces de zones urbaines, routes et rails, et forêts.
- Annexe 4.3 : Estimation des valeurs manquantes
- Annexe 4.4 : Résultat de la digitalisation des surfaces de Zone urbaine et Route&rail en '90
- Annexe 4.5 : Comparaison des données de différentes sources : 1) les valeurs recensées par communes, provenant du Bureau fédéral de statistique, et distribués par l'OFS et 2) les valeurs de la Statistique de la superficie de l'OFS distribuées par GEOSTAT, sous forme de trame de points dans un SIG.
- Annexe 5.1 : Description de la variable « Maïs / SAU »
- Annexe 5.2 : Poids des trois premières composantes C1, C2, C3 de "ACP50et60" effectuée sur les valeurs en '50 et '60, ainsi que de "ACP80et90" effectuée sur les valeurs '80 et '90 (N=1'872).

Annexe 5.3 : Projection des communes dans le plan défini par les deux composantes principales C2 et C3 des ACP en '50, '60, '80 et '90 (voir ACP (A), Tab.5.4).

Annexe 6.1 : Indice d'abondance de lièvres calculé sur 125 communes à partir des statistiques de chasse par zone affermée.

Annexe 6.2 : Pegase

Annexe 6.3 : Pegase et la base de données « Lièvre »

Annexe 6.4 : Matrice de corrélation entre les variables sur la base de données « Lièvre » en 1980.

Annexe 6.5 : Régression multiple linéaire entre l'Indice d'abondance de lièvres et les variables « Paysage » peu corrélées de la base de données « Lièvres » (N=125).

Annexe 7.1 : Matrice de corrélation entre les variables à l'état à chaque décennie ('50, '60, '70, '80 et '90)

Annexe 7.2 : Matrice de corrélation entre les variables de la base de données "Paysage clé" à l'état à chaque décennie (1950, 1960, 1970 et 1990) et les différences avec la décennie suivante ($\Delta 50-60$, resp. $\Delta 60-70$ et $\Delta 70-80$).

Annexe 7.3 : Nuages de points entre les variables « Main d'œuvre/SAU » et « Tracteur/SAU » à chaque décennies ('50, '60, '70, '80 et '90) (N=936) et sur l'ensemble des 5 décennies ('50à'90) (N=4'680), avec leur droite d'ajustement linéaire.

Annexe « Bd & Variables » (sur un CD) :

Bases de données « Paysage », « Lièvre » et « Paysage clé »

Description de chaque variable : Définition, sources, distributions, évolutions, cartes.

Annexe 4.1

Changements de numérotation des communes et variations des surfaces communales.

Etat 1996 selon GEOSTAT		Ancien état		District	Etat 1996 selon GEOSTAT		Ancien état		District
n°	Nom	n°	Année du changement		n°	Nom	n°	Année du changement	
2762	Allschwil	2802	1994	Arlesheim	6726	Vermes	482	1979	Delémont
2763	Arlsheim	2803	1994	Arlsheim	6727	Vicques	483	1979	Delémont
2764	Biel-Benken	2805	1994	Arlsheim	6741	Le Bémont (JU)	511	1979	Les Franches-M.
2765	Binningen	2806	1994	Arlsheim	6742	Les Bois	512	1979	Les Franches-M.
2767	Bottingen	2808	1994	Arlsheim	6743	Les Breuleux	513	1979	Les Franches-M.
2768	Ettingen	2809	1994	Arlsheim	6744	La Chaux-des-Breuleux	514	1979	Les Franches-M.
2769	Münchenstein	2810	1994	Arlsheim	6745	Les Entfers	515	1979	Les Franches-M.
2770	Muttenz	2811	1994	Arlsheim	6746	Epauvillers	516	1979	Les Franches-M.
2771	Oberwil (BL)	2812	1994	Arlsheim	6747	Epiquerez	517	1979	Les Franches-M.
2774	Schönenbuch	2815	1994	Arlsheim	6749	Goumois	518	1979	Les Franches-M.
2781	Blauen	641	1994	Laufen	6751	Montfaucon	519	1979	Les Franches-M.
2782	Brislach	642	1994	Laufen	6752	Montfavergier	520	1979	Les Franches-M.
2783	Burg im Leimental	643	1994	Laufen	6753	Muriaux	521	1979	Les Franches-M.
2784	Dittingen	644	1994	Laufen	6754	Le Noirmont	522	1979	Les Franches-M.
2785	Duggingen	645	1994	Laufen	6755	Le Peuchapatte	523	1979	Les Franches-M.
2786	Grellingen	646	1994	Laufen	6756	Les Pommerats	524	1979	Les Franches-M.
2787	Laufen	647	1994	Laufen	6757	Saignelégier	525	1979	Les Franches-M.
2789	Nenzlingen	649	1994	Laufen	6758	Saint-Brais	526	1979	Les Franches-M.
2790	Roggenburg	477	1994	Laufen	6759	Soubey	527	1979	Les Franches-M.
2791	Röschenz	650	1994	Laufen	6771	Alle	801	1979	Porrentruy
2793	Zwingen	652	1994	Laufen	6772	Asuel	802	1979	Porrentruy
4461	Amriswil (1)	4461 à 4464	~1980	Bischofszell	6774	Boncourt	804	1979	Porrentruy
4486	Hauptwil-Gottshaus (2)	4486 à 4487	1996	Bischofszell	6775	Bonfol	805	1979	Porrentruy
4561	Felben-Wellhausen (3)	4561 et 4562	1983	Frauenfeld	6776	Bressaucourt	806	1979	Porrentruy
4646	Ermatingen (4)	4646 et 4647	1975	Kreuzlingen	6778	Bure	808	1979	Porrentruy
4781	Wängi (5)		1969	Münchwil	6779	Charmoille	809	1979	Porrentruy
4831	Müllheim (6)		1967	Steckborn	6780	Chevenez	810	1979	Porrentruy
4891	Berg (TG) (7)	4891 à 4895	1995	Weinfelden	6781	Coeuve	811	1979	Porrentruy
4911	Bürglen (TG) (8)	4911 à 4915	1995	Weinfelden	6782	Cornol	812	1979	Porrentruy
4941	Märstetten (9)	4941 et 4942	1975	Weinfelden	6783	Courchavon	813	1979	Porrentruy
4951	Wigoltingen (10)	4951 à 4954	1995	Weinfelden	6784	Courgenay	814	1979	Porrentruy
6701	Bassecourt	461	1979	Delémont	6785	Courtedoux	815	1979	Porrentruy
6702	Boécourt	462	1979	Delémont	6788	Damvant	818	1979	Porrentruy
6703	Bourrignon	463	1979	Delémont	6789	Fahy	819	1979	Porrentruy
6707	Courfaivre	464	1979	Delémont	6790	Fontenais	820	1979	Porrentruy
6709	Courroux	465	1979	Delémont	6791	Fregiécourt	821	1979	Porrentruy
6710	Courtételle	466	1979	Delémont	6792	Grandfontaine	822	1979	Porrentruy
6711	Delémont	467	1979	Delémont	6794	Miécourt	824	1979	Porrentruy
6712	Develier	468	1979	Delémont	6795	Montenol	825	1979	Porrentruy
6713	Ederswiler	469	1979	Delémont	6797	Montmelon	827	1979	Porrentruy
6714	Glovelier	470	1979	Delémont	6798	Ocourt	828	1979	Porrentruy
6716	Mettembert	471	1979	Delémont	6799	Pleujouse	829	1979	Porrentruy
6717	Montsevelier	472	1979	Delémont	6800	Porrentruy	830	1979	Porrentruy
6718	Movelier	473	1979	Delémont	6801	Réclère	831	1979	Porrentruy
6719	Pleigne	474	1979	Delémont	6803	Rocourt	833	1979	Porrentruy
6720	Rebeuvelier	475	1979	Delémont	6804	Saint-Ursanne	834	1979	Porrentruy
6722	Saulcy	478	1979	Delémont	6805	Seleute	835	1979	Porrentruy
6724	Soyhières	480	1979	Delémont	6806	Vendincourt	836	1979	Porrentruy
6725	Undervelier	481	1979	Delémont					

Communes agrégées:

- (1) Amriswil, Biessenhofen, Oberaach, Rächlisberg
- (2) Gottshaus, Hauptwil
- (3) Felben, Wellhausen
- (4) Ermatingen, Triboltingen
- (5) Anetswil, Krillgerb, Tuttwil, Wängi
- (6) Langenhart, Müllheim
- (7) Andhausen, Berg (TG), Graltshausen, Mauren, Weerswilen
- (8) Bürglen (TG), Donzhausen, Hessenreuti, Leimbach (TG), Opferhofen (TG)
- (9) Märstetten, Otterberg
- (10) Bonau, Engwang, Illhart, Wigoltingen

Annexe 4.1

Communes dont la surface varie de plus de 10% en 20 ans:

N°	Commune	<u>1950</u>	<u>1970</u>	<u>1990</u>	<u>~50-70</u>	<u>~70-90</u>
177	Pfäffikon (ZH)		171'918	195'262		+13%
352	Bolligen (BE)		267'725	166'190		-38%
623	Rubingen (BE)		143'639	69'654		-52%
624	Schlosswil (BE)		94'810	34'600		-64%
927	Heiligenschwendi (BE)	65'743	55'476		-15%	
929	Hilterfingen (BE)	17'733	28'069		+58%	
(3234	Diepoldsau (SG)	111'477*	113'153		+1,5%)
4021	Baden (AG)	107'260	131'715		+22%	
4095	Brugg (AG)	38'273	55'825		+45%	
(5813	Chevroux (VD)	39'555	32'902	44'266	-16%	+34%)

Remarques:

- Les surfaces sont en ares
- Sources de données:
 - 1950: "Surface totale" de Statistique suisse de la superficie, OFS
 - 1970: "Surface totale" de Statistique suisse de la superficie, OFS
 - 1990: GEOSTAT
 - * digitalisé sur la carte nationale 1:25'000 de 1952.

Causes:

Pfäffikon¹: limites communales réadaptées avec les deux communes voisines, une fois autour de 1990, une fois un peu plus tard. Donc 1980 = 1970.

Bolligen²: se divise en 3 communes en 1983: Ittigen, Ostermundigen et Bolligen. Donc 1980 = 1970.

Rubingen³: se divise en 3 communes autour de 1990. Donc 1980 = 1970.

Schlosswil²: se divise en 2 communes en 1980: Oberhünigen et Schlosswil. Donc 1980 = 1990.

Heiligenschwendi²: se divise en 2 communes en 1950 et Hilterfingen lui est attribué. Donc 1960 = 1970.

Hilterfingen²: inclusion à Heiligenschwendi en 1950. Donc 1960 = 1970.

Diepoldsau: les limites communales sont différentes sur les cartes topo 1:25'000 de 1952 et 1967. Donc 1960 = 1970.

Baden²: inclusion de Dättwil en 1962. Donc 1960 = 1950.

Brugg²: inclusion de Lauffohr en 1970. Donc 1960 = 1950.

Chevroux⁴: On n'a probablement pas toujours tenu compte de la même façon de la surface variable, les marais au bord du lac. On part de l'hypothèse que la statistique de 1970 inclut la terre ferme, c'est-à-dire le terrain fixe. Donc 1990 et 1980 = 1970.

¹ Communication personnelle de l'administration communale de Pfäffikon, 7.7.2000.

² fichier "Population 50_90.xls" de M.Ullmann, OFS.

³ Communication personnelle de M. A. von Valdkirsch, Service cantonal AF de BE, 6.7.2000.

⁴ Communication personnelle de M. M. Antoniazza, GEG Grande Carrière, 7.7.2000.

Annexe 4.2

Ajustement des relevés sur les cartes (1:50'000) aux données GEOSTAT de l'OFS : surfaces de zones urbaines, routes et rails, et forêts.

Dimensions estimées:		
largeur des routes classe 1:	R1	18 m
largeur des routes classe 2:	R2	12 m
largeur des routes classe 3:	R3	7.5 m
largeur des rail 1 voie	rail 1	10 m
surface des bâtiments isolés		550 m ²

Cartes utilisées:	
n°	année
217	1984
218	1984
226	1984
227	1983
228	1983
236	1983
237	1984
246	1985

Résultat: Coefficients de correction:	
coefficient "zone urbaine":	0.89947
coefficient "route et rail":	5.310231
coefficient "forêt":	0.890351

Comparaisons:

	Zone urbaine				S mesurée ares	GEOSTAT ares
	continu compté nb mm ²	continu surface ares	isolé compté nb	isolé surface ares		
3232 Balgach	464	11600	58	319	11'919	10'600
3234 Diepoldsau	816	20400	83	456.5	20'857	12'500
3253 Marbach (SG)	172	4300	77	423.5	4'724	4'600
3255 Rebstein	316	7900	101	555.5	8'456	9'600

	type	nombre nb mm	longueur m	largeur m	total par type ares	total ares		S mesurée ares	GEOSTAT ares
Balgach	R3	70	3500	7.5	262.5				
3234 Diepoldsau	R1	50	2500	18	450	607.8	Diepoldsau	608	5'800
Diepoldsau	R2	10.8	540	12	64.8				
Diepoldsau	R3	24.8	1240	7.5	93				
3253 Marbach	R1	3	150	18	27	848.25	Marbach	848	2'300
Marbach	R2	85	4250	12	510				
Marbach	R3	83	4150	7.5	311.25				
3255 Rebstein	rail 1	22	1100	10	110	796.25	Rebstein	796	1'900
Rebstein	R2	90	4500	12	540				
Rebstein	R3	39	1950	7.5	146.25				

	nombre nb de mm ²	Forêt	
		S mesurée ares	GEOSTAT ares
3232 Balgach	392	9800	11600
3234 Diepoldsau	126	3150	1700
3253 Marbach	41	1025	900
3255 Rebstein	100	2500	2400

Annexe 4.3

Estimation des valeurs manquantes.

Variable	Canton	Numero	Commune	Variable	Méthode d'extrapolation
zu, rr, forêt	1	26	Dorf	50zu, 50rr	50zu = 50zu Humlikon. 50rr: Application de la moyenne des différences normalisées 50->70 des communes du district Andelfingen
	15	3037	Walzenhausen	50zu, 50rr	Application de la moyenne des différences normalisées 50->80 des communes du district Vorderland
	3	1089	Knutwil	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr, 70forêt	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000, puis multiplication des surfaces théoriques par un coefficient calculé par un essai sur trois communes arpentées et digitalisées.
	3	1091	Mauensee	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	3	1127	Egolzwil	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	3	1133	Kottwil	50zu, 50rr, 50forêt	cf ci-dessus
	3	1143	Schötz	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	3	1146	Wauwil	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	17	3232	Balgach	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	17	3234	Diepoldsau	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	17	3251	Altstätten	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	17	3253	Marbach (SG)	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	17	3254	Oberriet (SG)	50zu, 50rr, 50forêt	cf ci-dessus
	17	3255	Rebstein	50zu, 50rr, 50forêt, 70zu, 70rr,	cf ci-dessus
	tout			60zu, 60rr, 60forêt	60 = (50+70)/2
	1	54	Dietlikon	70zu	Application de la moyenne des différences normalisées 70->80 des communes du district
	1	58	Glatfelden	70zu	cf ci-dessus
	1	66	Opfikon	70zu	cf ci-dessus
	1	69	Wallisellen	70zu	cf ci-dessus
	1	97	Rümlang	70zu	cf ci-dessus
	1	137	Oberrieden	70zu	cf ci-dessus
	1	191	Dübendorf	70zu	cf ci-dessus
	1	200	Wangen-Brütisellen	70zu	cf ci-dessus
	1	243	Dietikon	70zu	cf ci-dessus
	15	3021	Bühler	70zu	cf ci-dessus
	15	3022	Gais	70zu	cf ci-dessus
	15	3024	Teufen (AR)	70zu	cf ci-dessus
	15	3037	Walzenhausen	70zu	cf ci-dessus
	16	3101	Appenzell	70zu	$70zu = 50zu + ((80zu - 50zu) / 3 * 2)$
	16	3102	Gonten	70zu	$70zu = 50zu + ((80zu - 50zu) / 3 * 2)$
	16	3104	Schlatt-Haslen	70zu	$70zu = 50zu + ((80zu - 50zu) / 3 * 2)$
	5	1342	Galgenen	90zu, 90rr, 90forêt	90forêt: Le nombre de points dans les inventaires 86 et 95 ont été comptés. La moyenne entre la surface ainsi mesurée en 95 et la surface calculée a été calculée ainsi: Geostat pour 80 + différence entre le nombre de points comptés (Moyenne entre les deux méthodes).
	5	1344	Lachen	90zu, 90rr, 90forêt	90zu, 90rr: Les différences entre 1980 et 1990 ont été relevées sur les cartes nationales au 1:50'000 (calque et papier millimétré), puis les surfaces en 1980 de 4 communes (3232 Balgach, 3234 Diepoldsau, 3253 Marbach, 3255 Rebstein), afin de calculer des coefficients de correction entre les valeurs mesurées sur la carte et les valeurs répertoriées par GEOSTAT. Les valeurs 90 ont alors été calculées avec ces mêmes coefficients.
	5	1347	Tuggen	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus. Saisie\Ech1\Saisie
	5	1349	Wangen (SZ)	90zu, 90rr, 90forêt	carte\calibrage_80_zu_rr_foret.xls\Calibrage
	5	1372	Schwyz	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus. Saisie\Ech1\Corrections_extrapolations\corrections_zu.xls
	15	3021	Bühler	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3022	Gais	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3023	Speicher	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3024	Teufen (AR)	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3025	Trogen	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3033	Lutzenberg	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3035	Reute (AR)	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3036	Wald (AR)	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3037	Walzenhausen	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	15	3038	Wolfhalden	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	16	3101	Appenzell	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	16	3102	Gonten	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus

Annexe 4.3

(suite)

Variable	Canton	Numero	Commune	Variable	Méthode d'extrapolation
production lait	16	3104	Schlatt-Haslen	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3203	St.Gallen	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3232	Balgach	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3234	Diepoldsau	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus sauf foret: 80foret/3, sinon valeur négative!!!
	17	3237	Thal	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3251	Altstätten	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3253	Marbach (SG)	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3254	Oberriet (SG)	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3255	Rebstein	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3316	Weesen	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3374	Lichtensteig	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3377	Wattwil	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3393	Lütisburg	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3402	Flawil	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	17	3407	Oberuzwil	90zu, 90rr, 90forêt	cf ci-dessus
	10			50lait, 60lait, 70lait	70 = 80-(Différence70->80moyenne sur les cantons "entiers")
		12		50lait, 60lait, 70lait, 80lait, 90lait	cf ci-dessus
		14		50lait, 60lait	cf ci-dessus
		22		50lait, 60lait	cf ci-dessus
	24		50lait, 60lait	cf ci-dessus	
	25		50lait, 60lait, 70lait	cf ci-dessus	
taille parcelles	1	161	Zollikon	80taille p., 90taille p.	80 = 70+(Différence 70->80moyenne sur le district Zürich)
	2	714	Vellerat	80taille p., 90taille p.	80 = 70+(Différence 70->80moyenne sur le district
vergers intensifs	tout			50verger	50commune = 50district*(60commune/60district)
surface communale	tout			60S, 80S	60 = (50+70)/2 sauf si grands changements datés
	3	1089	Knutwil	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	3	1091	Mauensee	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	3	1127	Egolzwil	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	3	1133	Kottwil	50S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	3	1143	Schötz	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	3	1146	Wauwil	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	17	3232	Balgach	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	17	3234	Diepoldsau	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	17	3251	Altstätten	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	17	3253	Marbach (SG)	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	17	3254	Oberriet (SG)	50S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
	17	3255	Rebstein	50S, 70S	Digitalisation des cartes nationales 1:25'000
voiture tourisme	tout			50voiture, 60voiture	% moyen 75-85-98 de la commune par rapport au canton
bâtiments d'habitation	20	4761	Busswil (TG)	70bat, 80bat, 90bat	70bat: 60bat+ (différence moyenne normalisée sur les communes du district de Münchwilen de 60->70)

Annexe 4.4

Résultat de la digitalisation de "Zone urbaine" et "Route&rail" en '90.

N° commune	Commune	Zone urbaine valeurs ajustées en [ares]	Route et rail
1342	Galgenen	0.0	1'620.9
1344	Lachen	0.0	0.0
1347	Tuggen	134.9	159.3
1349	Wangen (SZ)	1'034.4	314.6
1372	Schwyz	1'011.9	39.8
3021	Bühler	202.4	155.3
3022	Gais	89.9	617.3
3023	Speicher	31.5	0.0
3024	Teufen (AR)	134.9	438.1
3025	Trogen	89.9	-67.7
3033	Lutzenberg	112.4	191.2
3035	Reute (AR)	22.5	36.6
3036	Wald (AR)	22.5	0.0
3037	Walzenhausen	0.0	59.7
3038	Wolfalden	265.3	0.0
3101	Appenzell	440.7	1'214.7
3102	Gonten	81.0	-697.0
3104	Schlatt-Haslen	134.9	179.2
3203	St.Gallen	2'136.2	485.9
3232	Balgach	179.9	178.4
3234	Diepoldsau	238.4	-4.0
3237	Thal	562.2	21.4
3251	Altstätten	1'000.7	2'133.9
3253	Marbach (SG)	416.0	117.5
3254	Oberriet (SG)	337.3	65.3
3255	Rebstein	517.2	6.0
3316	Weesen	22.5	310.6
3374	Lichtensteig	0.0	398.3
3377	Wattwil	157.4	4'034.4
3393	Lütisburg	247.4	1'087.3
3402	Flawil	22.5	159.3
3407	Oberuzwil	179.9	908.0

Cartes (échelle 1:50'000):

N° carte	Edition	Edition
217	1984	1996
218	1984	1990
226	1984	2000
227	1983	2000
228	1983	2000
236	1983	2000
237	1984	1999
246	1985	1999

Largeurs, surfaces et estimation des coefficients d'ajustement:

(tiré de l'Annexe 4.2)

Largeur routes classe 1:	R1	18 m
Largeur routes classe 2:	R2	12 m
Largeur routes classe 3:	R3	7.5 m
Largeur rail classe 1:	rail 1	10 m
Surfaces de batiments isolés:		550 m ²
Coefficient Zones urbaine:		0.899
Coefficient Route et rail:		5.310

Annexe 4.5

Comparaison des données de différentes sources : 1) les valeurs recensées par communes, provenant du Bureau fédéral de statistique, et distribués par l'OFS et 2) les valeurs de la Statistique de la superficie de l'OFS distribuées par GEOSTAT, sous forme de trame de points dans un SIG.

Les variables "Zone urbaine", "Route et rail" ainsi que "Forêt" ont été extraites, pour les décennies 1950 et 1970, des Statistiques d'utilisation du sol de 1952 et 1972 (Bureau fédéral de statistique, 1953 ; Bureau fédéral de statistique, 1972). Ces statistiques n'ont pas été effectuées par la suite.

Pour les deux décennies suivantes (1980 et 1990), les trois variables ont été tirées des Statistiques de la superficie 79/85 et 92/97 (OFS, 1996), distribuées par le service GEOSTAT de l'OFS (OFS, 1993). Les classes correspondantes ont été sélectionnées dans le fichier SIG, puis agrégées par commune. Chaque point a été considéré comme étant représentatif d'un hectare, ce qui nous a permis de calculer la surface occupée par chacun de ces trois types d'occupation du sol.

L'analyse des données de "Zone urbaine" et "Route et rail" montre qu'elles présentent une forte discontinuité entre 1970 et 1980, qui ne semble pas seulement due à une évolution de l'occupation du sol: on constate, en effet, pour certaines communes, de fortes diminutions de surfaces de zones urbaines (en moyenne de 1'813 ares, au maximum de 20'657 ares), ainsi que de route et rail (en moyenne 3'138 ares, au maximum 4'319 ares), ce qui n'est évidemment pas possible! Dans le cas des forêts, par contre, il est tout à fait possible d'avoir une diminution des surfaces entre 1970 et 1980, et les données de GEOSTAT sont certainement assez représentatives de la réalité parce que les surfaces de forêts sont grandes. Il est toutefois probable qu'il existe une différence, due au changement de méthode, mais qu'elle n'est malheureusement pas possible de quantifier par rapport à la différence due à l'évolution réelle: il n'a pas été fait de recensement ou de levé de ces trois types d'occupation du sol après 1972, avec lesquels on pourrait comparer les données de GEOSTAT.

Pour avoir tout de même une idée de l'erreur méthodologique possible engendrée par ces deux relevés et savoir s'il est possible d'utiliser la série chronologique depuis 1950 jusqu'à 1990 pour ces trois variables, nous avons comparé : 1) les valeurs de « SAU » en '80 et '90 provenant des recensements fédéraux de l'agriculture et de l'horticulture effectués par l'OFS, anciennement le BFS (Bureau fédéral de statistique (1981), resp. OFS (1992)) avec 2) les valeurs de « Surface agricole utile » en '90, provenant de la Statistique de la superficie de l'OFS distribuée par GEOSTAT. Remarquons que la Statistique de la superficie de l'OFS inclut les pâturages, contrairement aux recensements fédéraux de l'agriculture et de l'horticulture. Nous avons effectué cette comparaison sur les 904 communes couvertes par GEOSTAT (Tab. A 4.5.1).

La moyenne des erreurs entre les deux méthodes en 1990 est de -0.000415 ares/ares, avec un écart type de 0.00156.

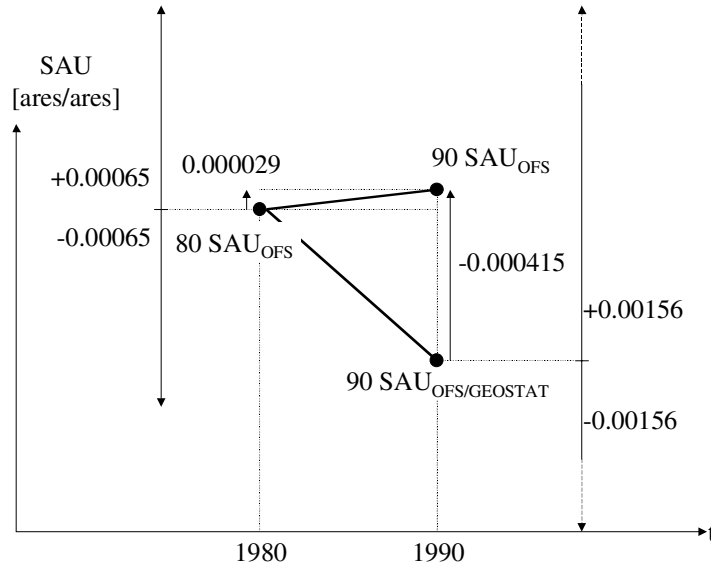
La différence moyenne entre 1980 et 1990, montrant l'évolution réelle moyenne de la variable SAU (recensements fédéraux de l'agriculture et de l'horticulture effectués par l'OFS), n'est, elle, que de 0.000029 ares/ares, avec un écart type de 0.00065.

Annexe 4.5

Tab. A 4.5.1: Comparaison des méthodes de relevés pour SAU et Surface agricole utile en 1980 et 1990. SAU_{OFS} : recensements fédéraux de l'agriculture et de l'horticulture effectués par l'OFS ; SAU_{OFS/GEOSTAT} : Statistique de la superficie de l'OFS distribuée par GEOSTAT. SC : Surface communale.

	90 SAU _{OFS}	90 SAU _{OFS/GEOSTAT}	90SAU _{OFS/GEOSTAT} - 90SAU _{OFS}		90SAU _{OFS} - 80SAU _{OFS}
	ares	ares	ares	ares/ares de SC	ares/ares de SC
Somme	37'893'828	35'318'000	-2'575'828	-0.37	0.03
Moyenne	41'918	39'069	-2'849	-0.000415	0.000029
Moyenne en % par rapport à 90 SAU _{OFS}			-6.80		
Surface des 904 communes	79'854'168	79'854'168			
Part de la surface totale des 904 communes en %	47	44			
Ecart-type				0.00156	0.00065

Fig. A 4.5.1: Moyennes et écart type de la différence méthodologique (90SAU_{OFS/GEOSTAT} - 90SAU_{OFS}) et de l'évolution réelle (90SAU_{OFS} - 80SAU_{OFS}). SAU_{OFS} : recensements fédéraux de l'agriculture et de l'horticulture effectués par l'OFS ; SAU_{OFS/GEOSTAT} : Statistique de la superficie de l'OFS et distribuées par GEOSTAT.



La comparaison entre ces deux différences montre que la différence entre les sources de données est plus de dix fois plus importante que l'évolution entre deux décennies. La différence n'est pas uniquement due à la différence de définition de la SAU, car celle-ci impliquerait une valeur moyenne SAU_{OFS/GEOSTAT} supérieure à la moyenne SAU_{OFS} (SAU_{OFS/GEOSTAT} inclut les pâturages, au contraire de SAU_{OFS}). Notre vérification nous amène donc à la conclusion que ces deux sources de données ne sont pas directement comparables. Le mélange de ces deux sources de données pour les variables "Zone urbaine", "Route et rail" et "Forêt" dans une série chronologique de valeurs depuis 1950 jusqu'à 1990 ne peut se faire qu'avec prudence. Il est indispensable de tenir compte de cette discontinuité entre 1970 et 1980.

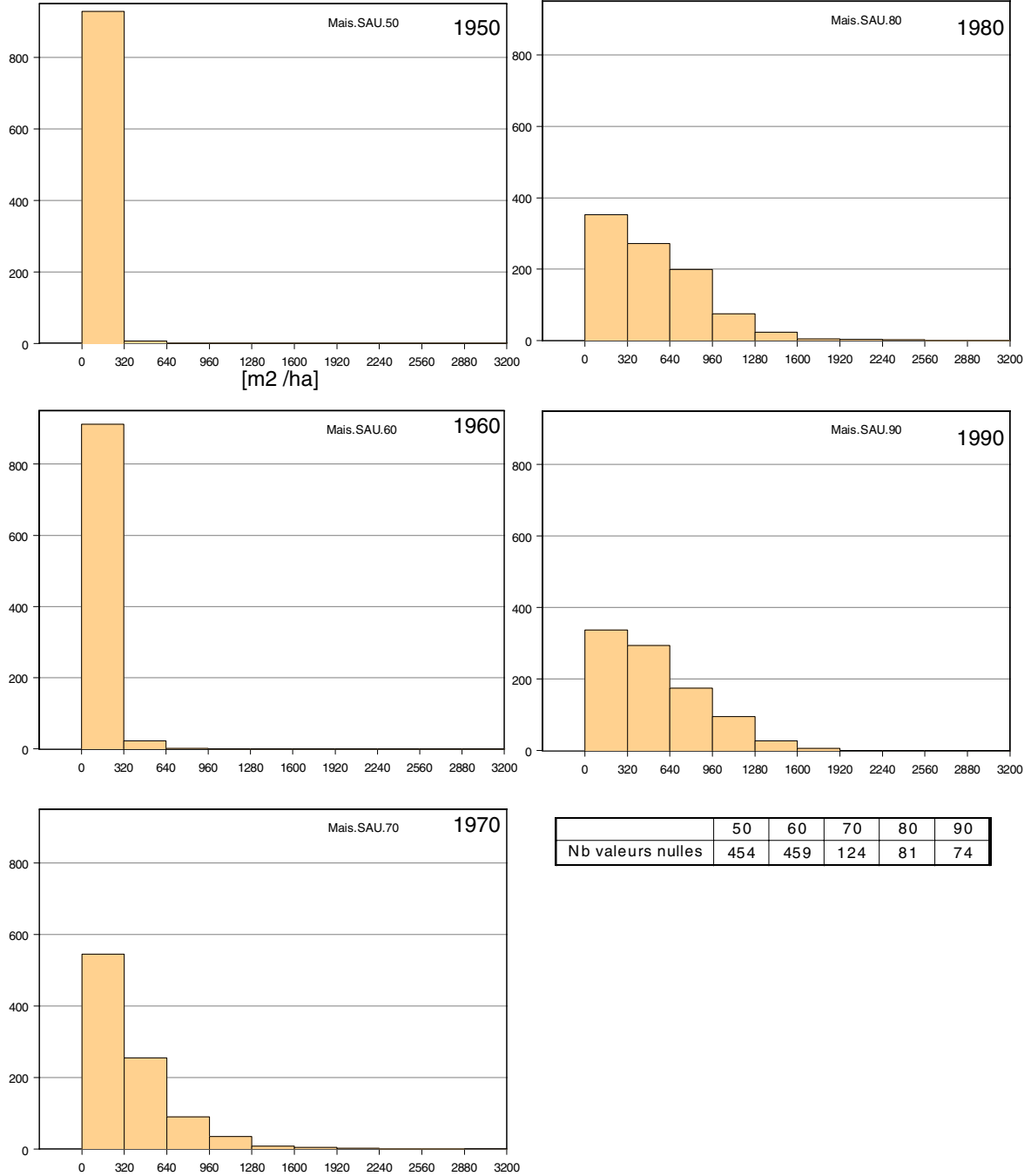
Description de la variable « Maïs / SAU » (Fonds de cartes : OFS GEOSTAT / S+T).

Maïs/SAU

5 décennies: 1950, 1960, 1970, 1980 et 1990

Histogrammes

Nb communes



	50	60	70	80	90
Nb valeurs nulles	454	459	124	81	74

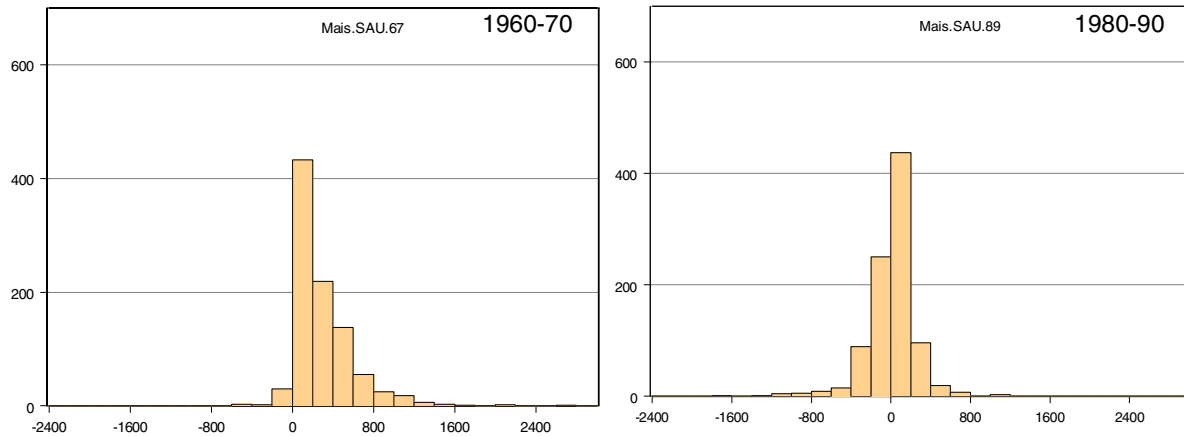
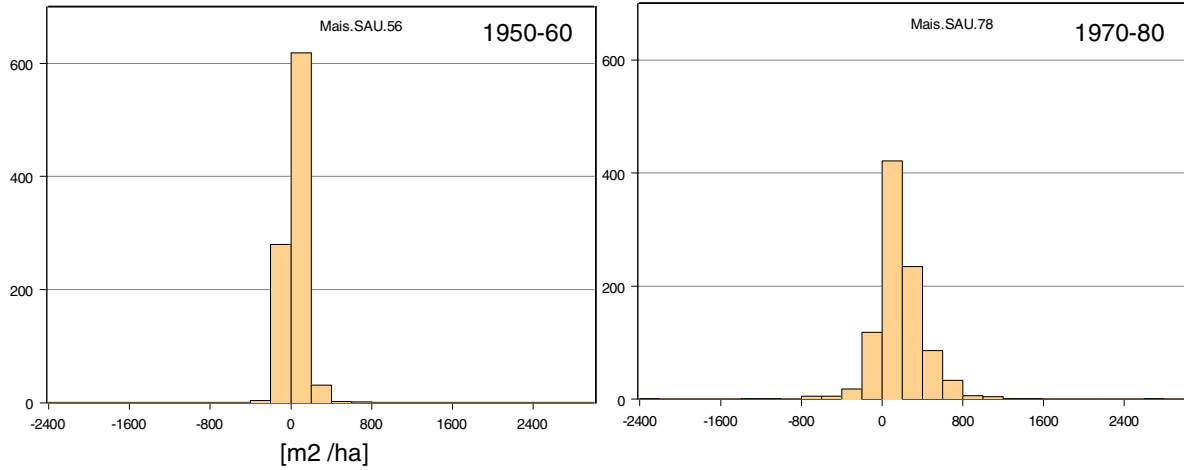
Echantillon: 936 communes

Maïs/SAU

Evolution entre 5 décennies: 1950-60, 1960-70, 1970-80 et 1980-90

Histogrammes

Nb communes

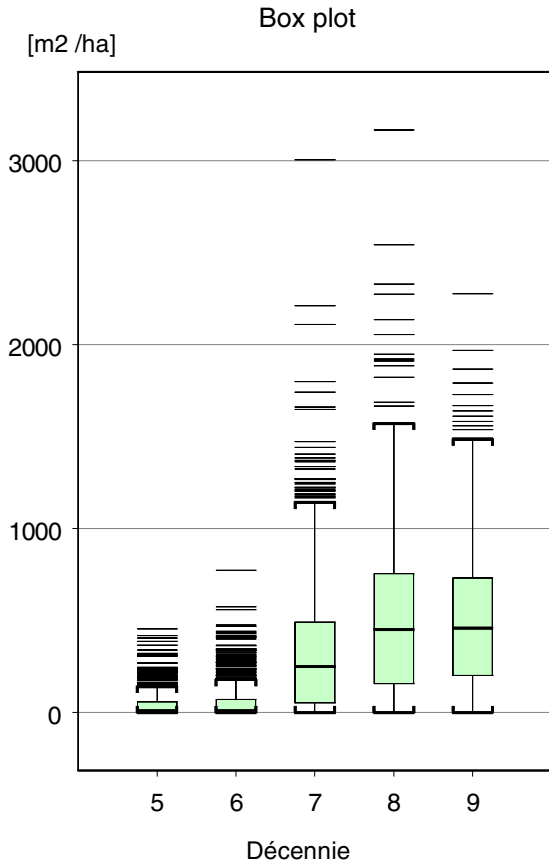


	50-60	60-70	70-80	80-90
Nb valeurs nulles	311	112	58	57

Echantillon: 936 communes

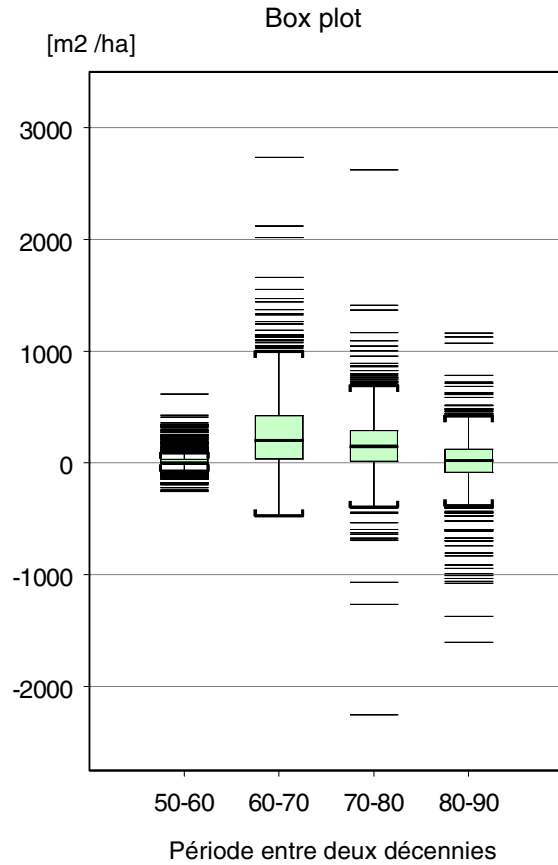
Maïs/SAU

5 décennies:
1950, 1960, 1970, 1980 et 1990



	50	60	70	80	90
Min:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1st quanti	0.0	0.0	54.2	158.8	200.1
Mean:	39.0	52.8	327.3	498.0	505.5
Median:	9.8	10.4	250.1	449.5	459.5
3rd quanti	56.4	71.1	489.6	753.3	730.6
Max:	454.5	773.5	3'006.9	3'166.8	2'277.2
Std Dev.:	62.2	88.4	341.0	411.4	381.4
SE mean:	2.0	2.9	11.1	13.4	12.5

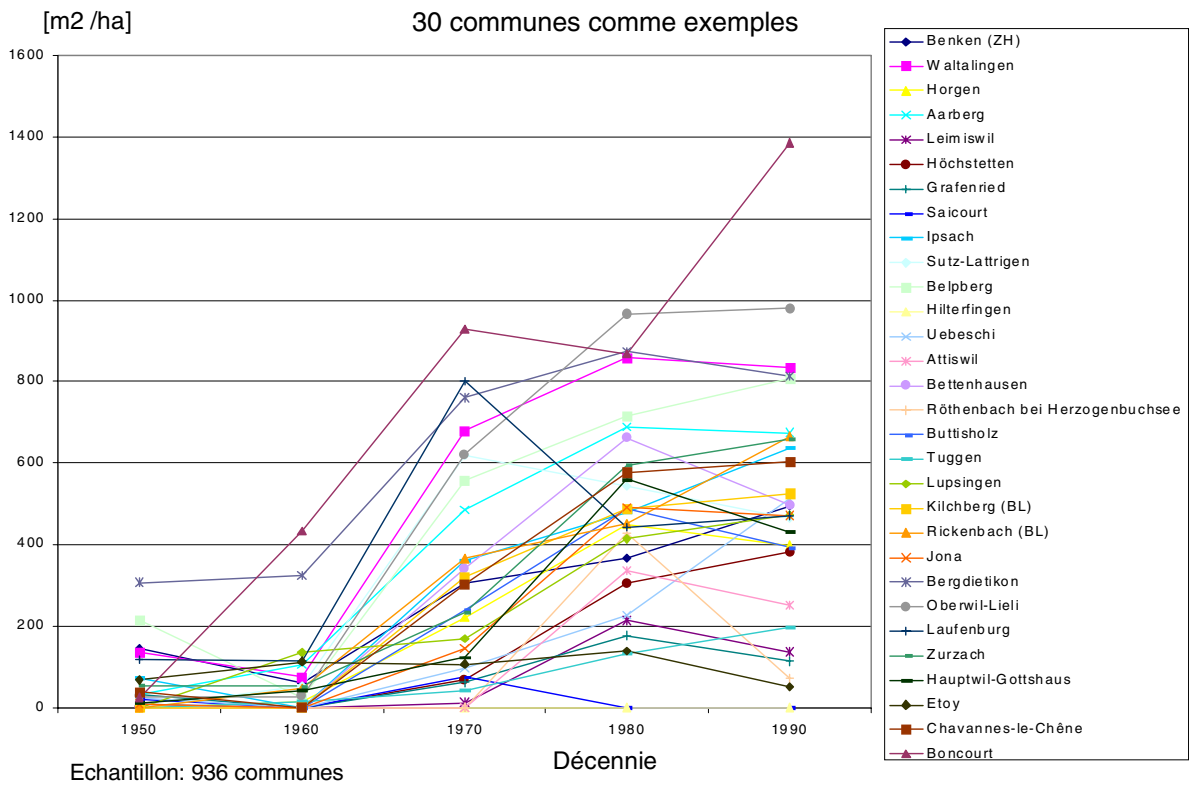
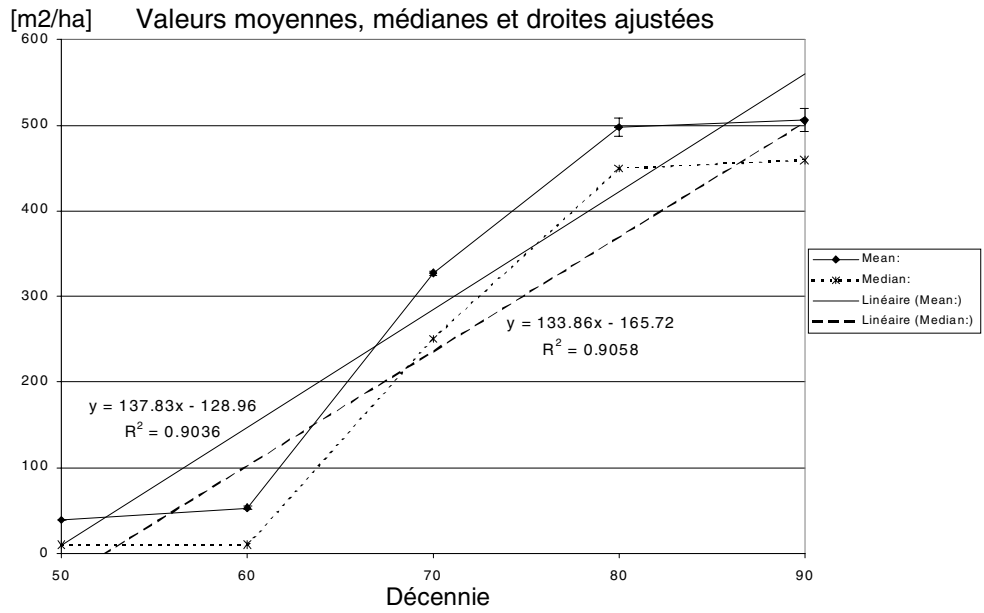
Evolution entre 5 décennies:
1950-60, 1960-70, 1970-80 et 1980-90



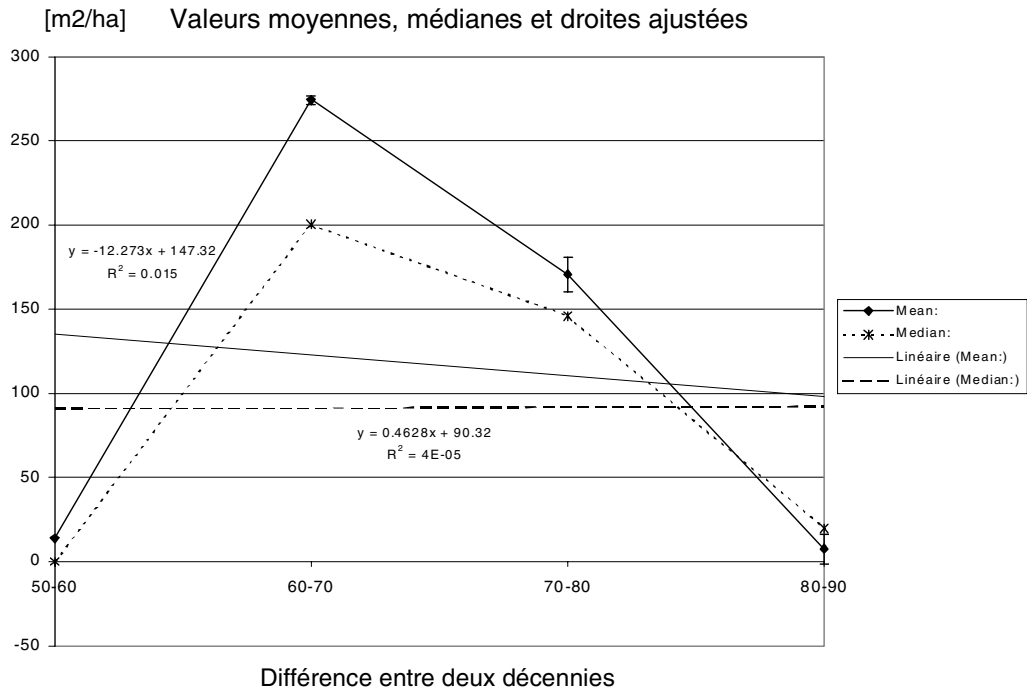
	50-60	60-70	70-80	80-90
Min:	-254.0	-474.5	-2'256.1	-1'608.6
1st quanti	-11.2	36.6	14.6	-82.8
Mean:	13.8	274.5	170.7	7.5
Median:	0.0	200.3	146.0	19.7
3rd quanti	29.9	420.6	289.8	121.9
Max:	614.7	2'735.5	2'619.8	1'159.9
Std Dev.:	80.3	311.8	267.6	238.3
SE mean:	2.6	10.2	8.7	7.8

Echantillon: 936 communes

Maïs/SAU

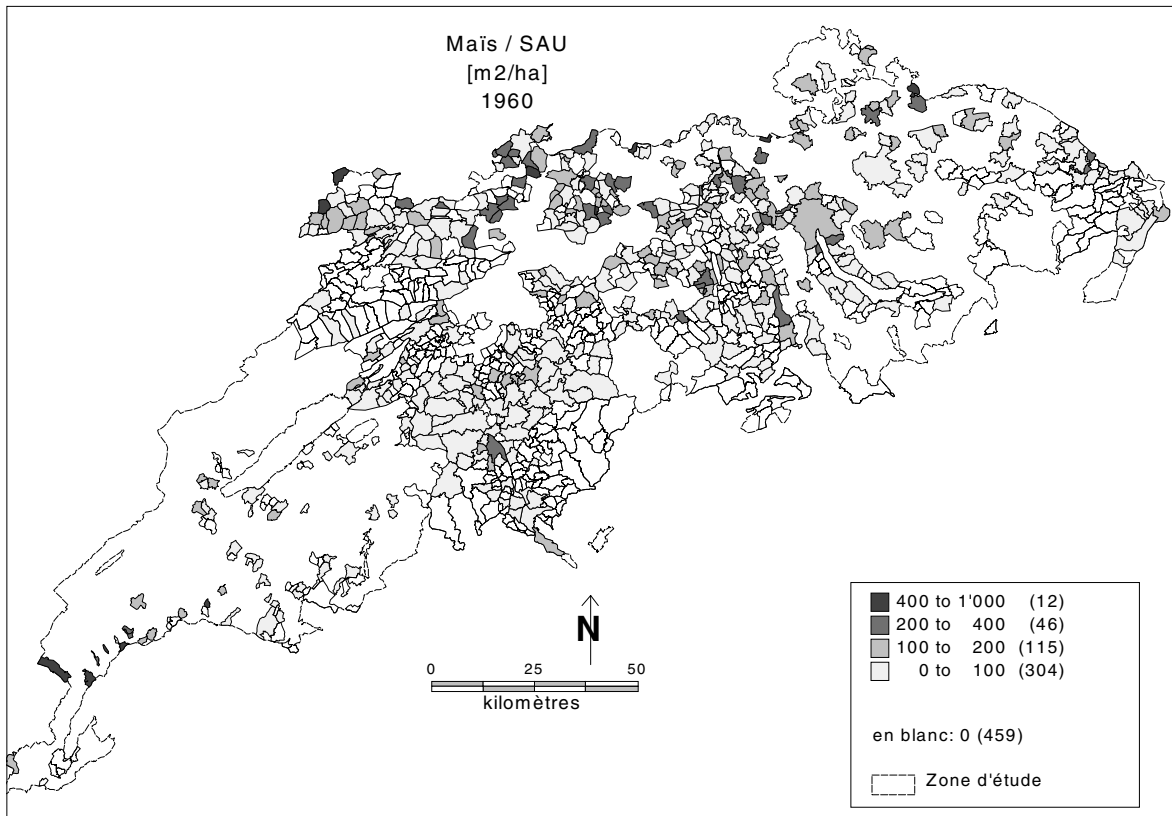
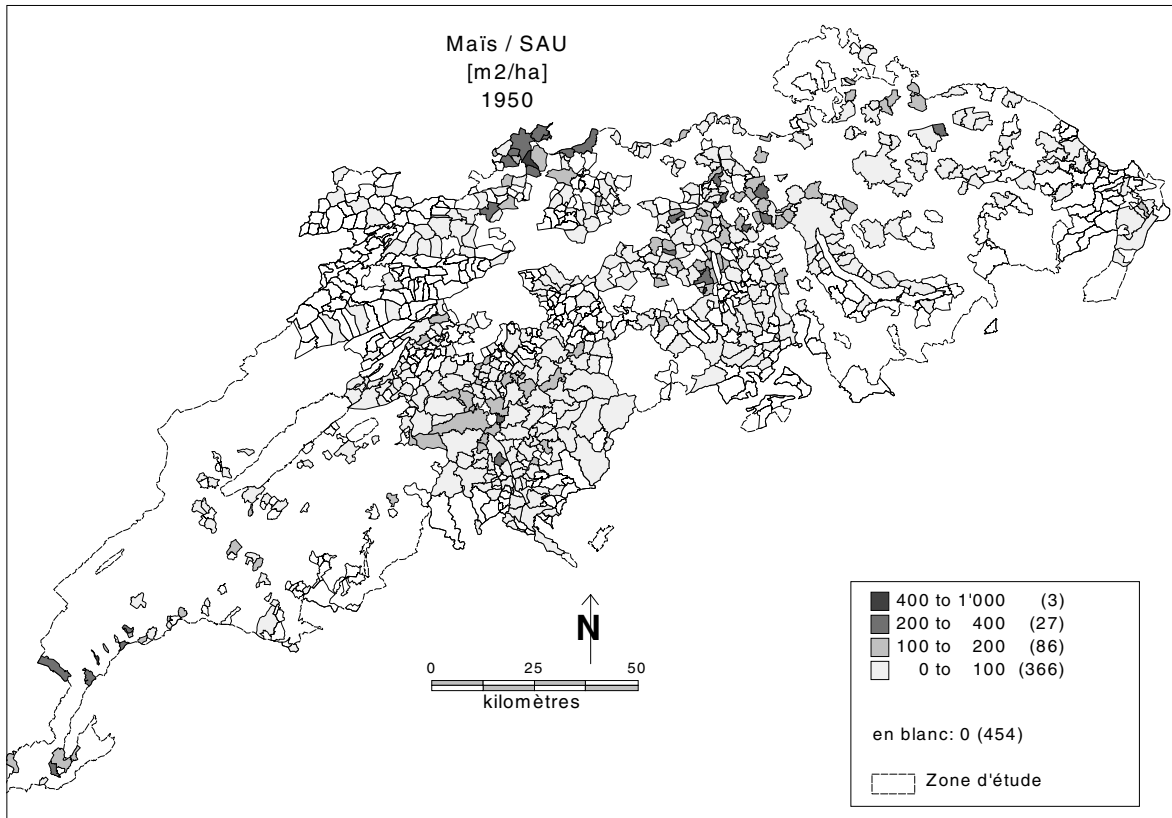


Maïs/SAU

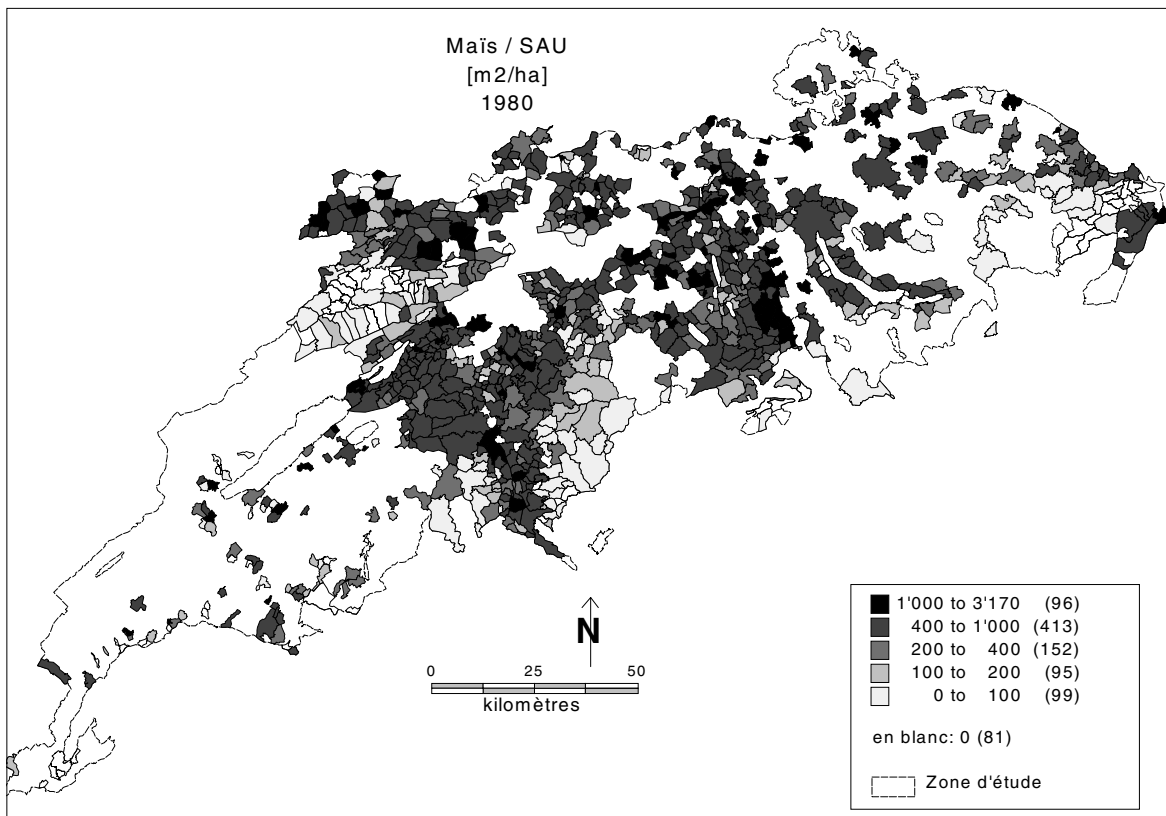
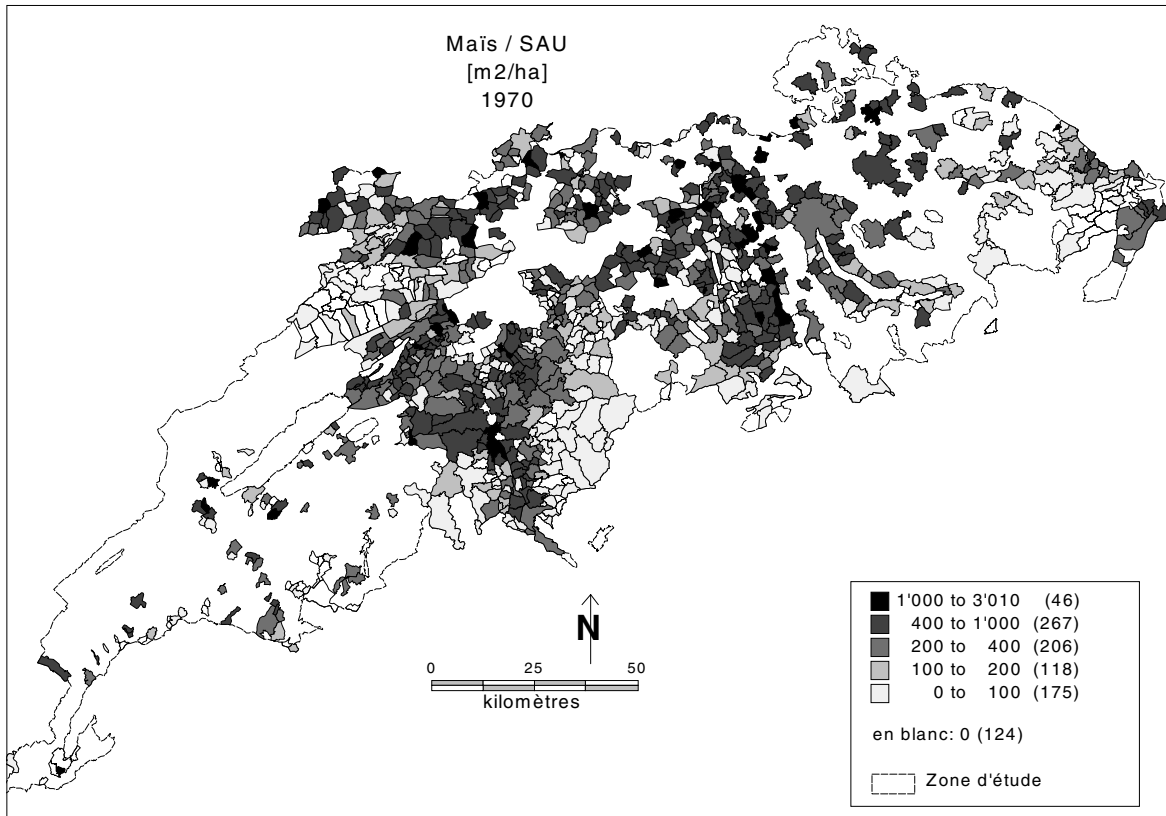


Echantillon: 936 communes

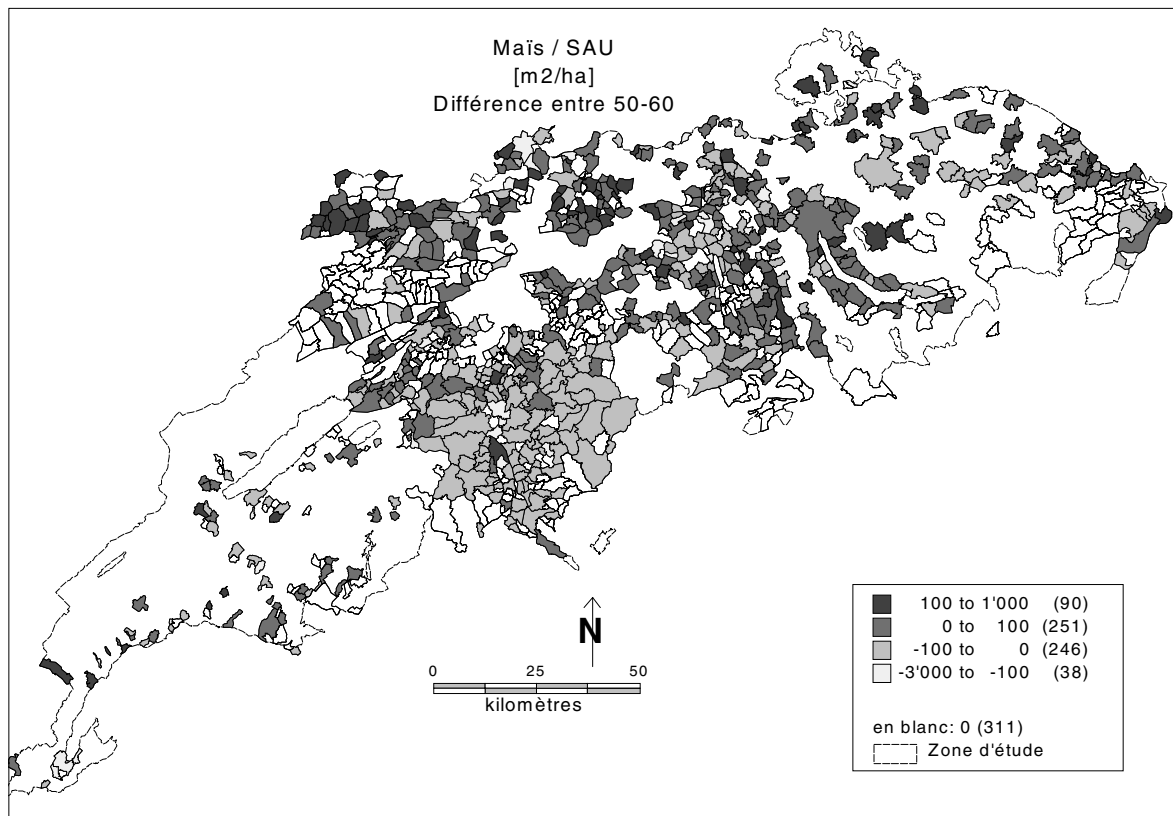
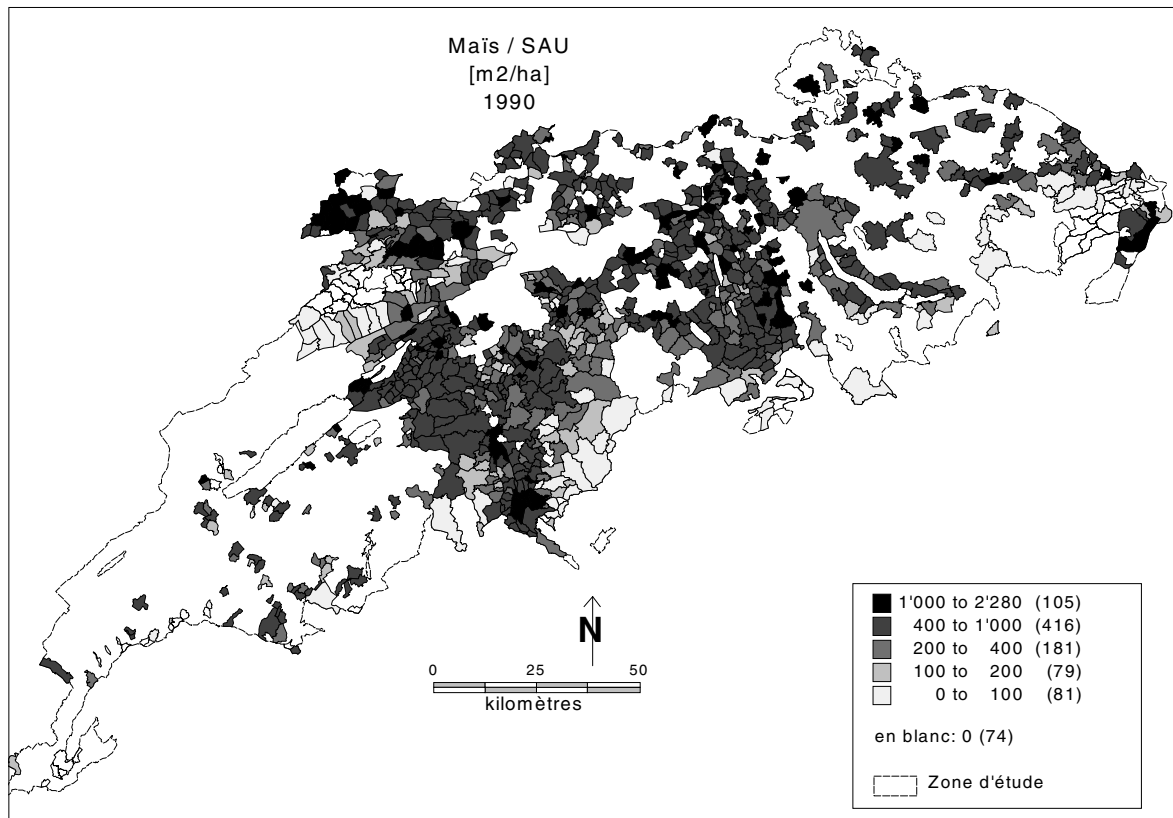
Annexe 5.1



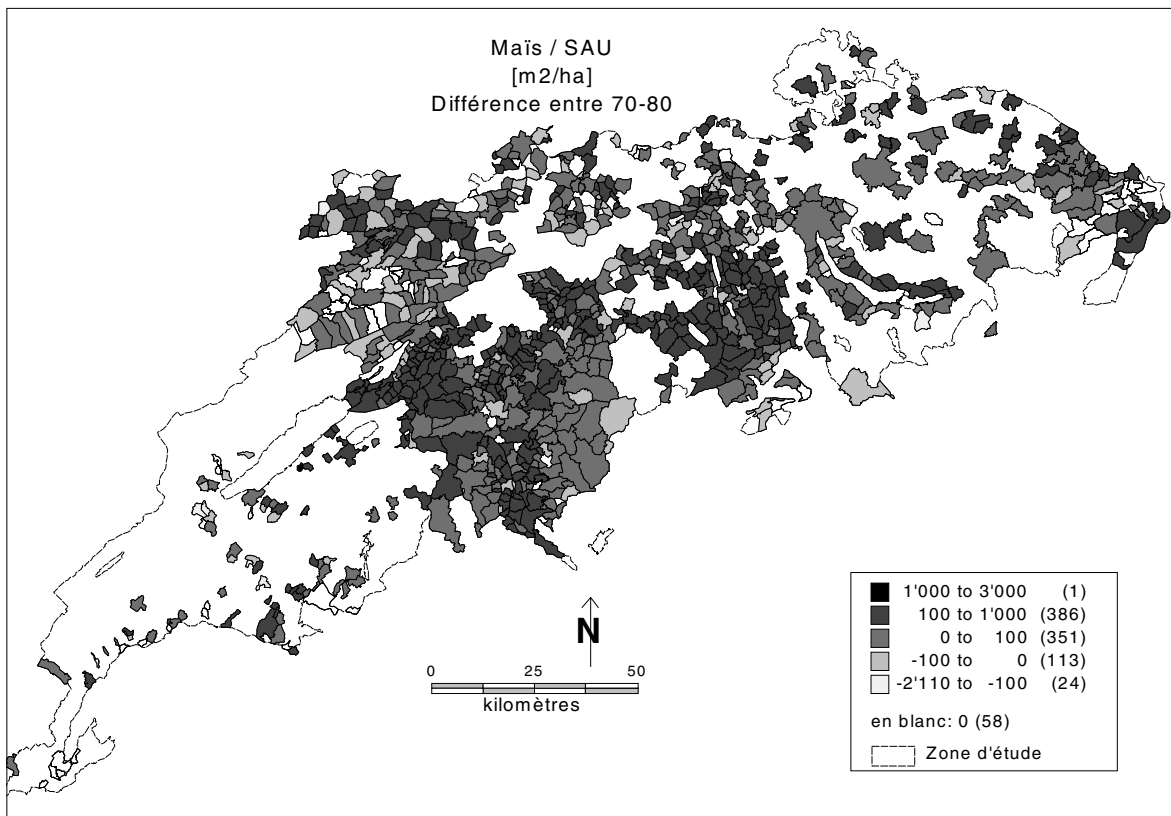
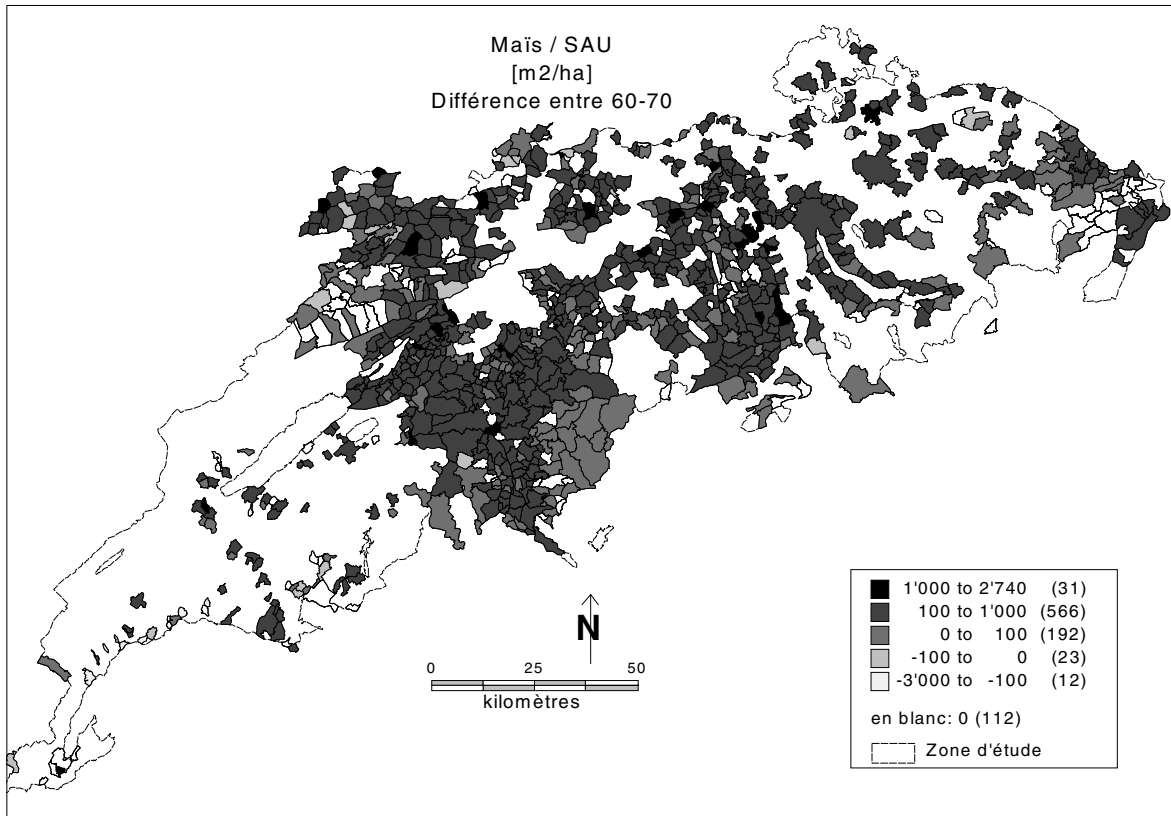
Annexe 5.1



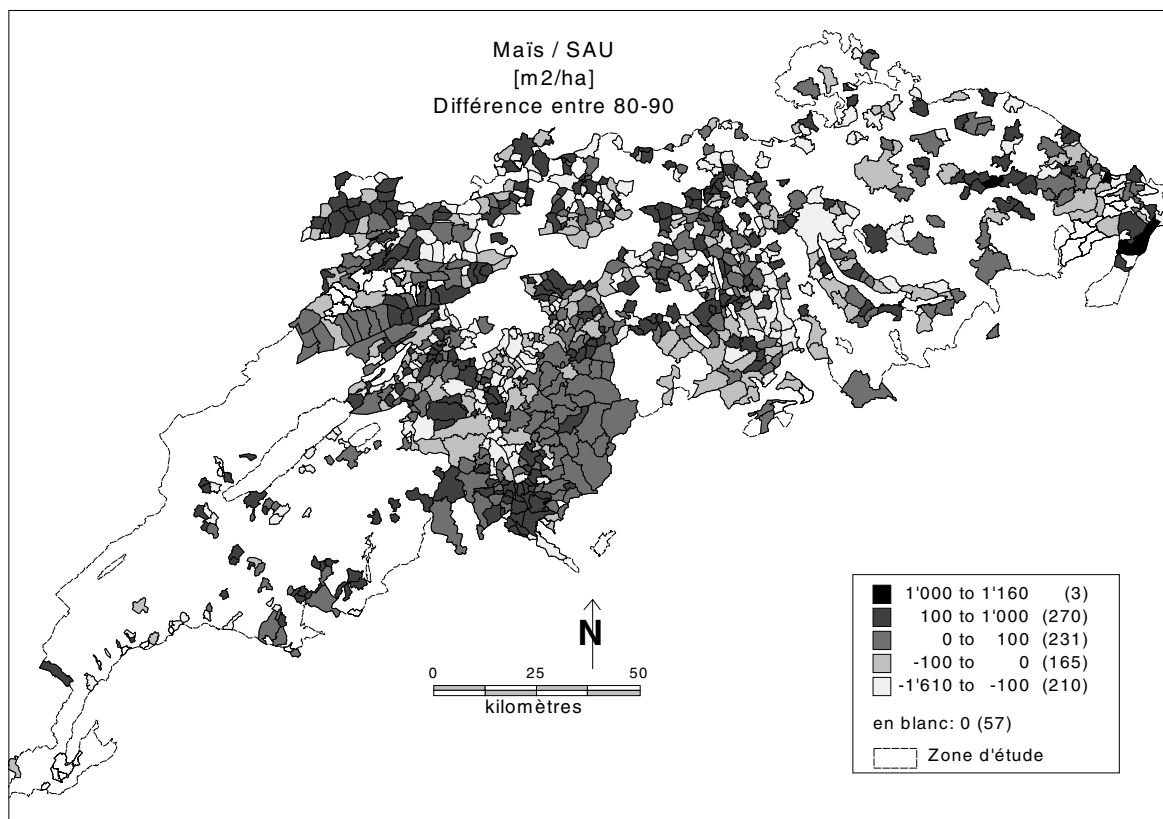
Annexe 5.1



Annexe 5.1



Annexe 5.1



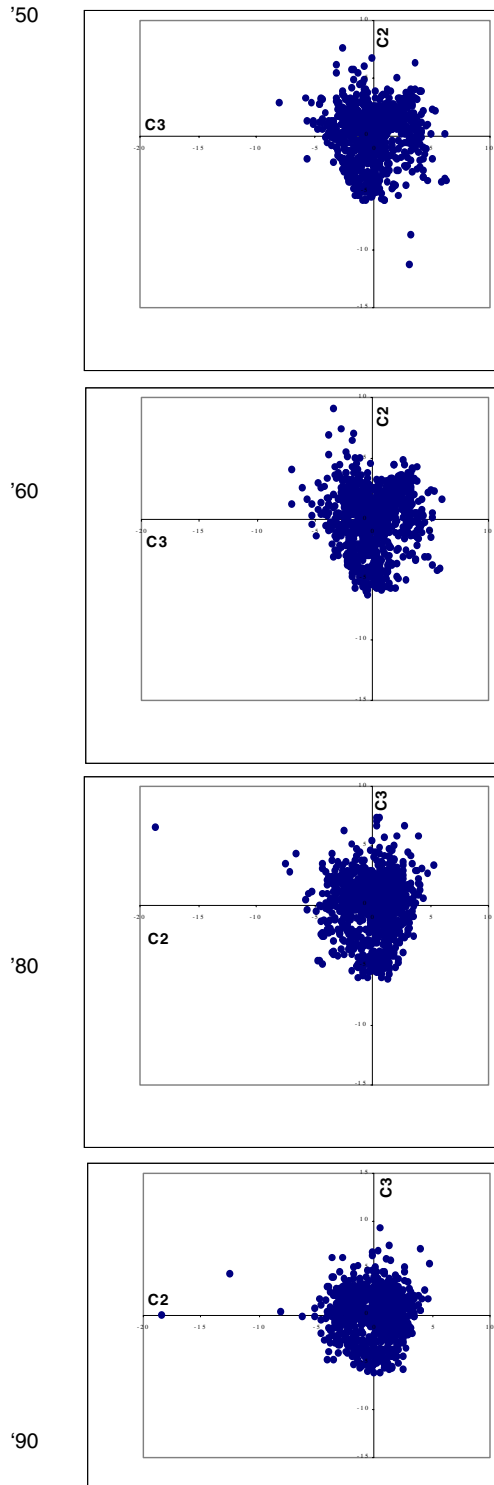
Annexe 5.2

Poids des trois premières composantes C1, C2, C3 de "ACP50et60" effectuée sur les valeurs en '50 et '60, ainsi que de "ACP80et90" effectuée sur les valeurs '80 et '90 (N=1'872). Les poids dont la valeur absolue est \geq à 0.250 sont grisés.

N=2x936 communes				N=2x936 communes			
ACP50et60	C1	C2	C3	ACP80et90	C1	C2	C3
Part de la variance expliquée	18.5%	14.2%	10.6%	Part de la variance expliquée	19.5%	14.7%	10.7%
AgglDistance.50	-0.114	-0.091	0.037	AgglDistance.80	-0.128	-0.107	-0.003
AgglTaille.50	0.167	-0.031	-0.045	AgglTaille.80	0.176	-0.008	-0.004
Batiment.50	0.329	-0.030	-0.074	Batiment.80	0.303	0.039	-0.075
Foret.50	-0.075	-0.275	0.054	Foret.80	-0.022	-0.302	0.157
Lait.50	0.096	0.066	-0.133	Lait.80	0.082	0.003	0.068
Main.doeuvre.50	-0.062	0.341	-0.071	Main.doeuvre.80	-0.169	0.265	-0.189
MainDoeuvre.SAU.50	0.039	0.100	-0.089	MainDoeuvre.SAU.80	0.071	0.115	-0.229
Mais.50	0.064	0.114	0.133	Mais.80	-0.065	0.260	0.104
Mais.SAU.50	0.102	0.043	0.136	Mais.SAU.80	0.013	0.166	0.180
Mais.to.50	0.082	0.028	0.021	Mais.to.80	-0.029	-0.016	-0.182
Pluie10.50	-0.067	-0.064	-0.245	Pluie10.80	-0.066	-0.133	-0.134
Population.50	0.341	-0.056	-0.066	Population.80	0.325	0.034	-0.135
Population.SAU.50	0.302	-0.074	-0.034	Population.SAU.80	0.220	0.027	-0.168
RouteEtRail.50	0.319	0.063	-0.029	RouteEtRail.80	0.306	0.083	-0.059
RouteEtRail.SAU.50	0.315	-0.082	-0.026	RouteEtRail.SAU.80	0.256	0.022	-0.164
RouteNationale.50	0.071	0.021	-0.010	RouteNationale.80	0.110	0.020	0.009
RouteNationale.SAU.50	0.079	0.004	-0.021	RouteNationale.SAU.80	0.121	-0.036	0.015
SAU.50	-0.086	0.361	-0.030	SAU.80	-0.200	0.266	-0.098
SubventionAF.50	0.023	0.011	-0.062	SubventionAF.SAU.80	-0.098	0.052	-0.030
TailleParcelle.50	-0.004	0.006	-0.179	TailleParcelle.80	-0.091	-0.054	-0.116
TerreOuvrte.50	-0.018	0.289	0.284	TerreOuvrte.80	-0.060	0.303	0.237
TerreOuvrte.SAU.50	0.064	0.153	0.377	TerreOuvrte.SAU.80	0.049	0.220	0.347
Tracteur.50	-0.029	0.316	-0.151	Tracteur.80	-0.171	0.273	-0.188
Tracteur.SAU.50	0.065	0.117	-0.170	Tracteur.SAU.80	0.066	0.121	-0.211
Vache.50	-0.060	0.330	-0.229	Vache.80	-0.204	0.196	-0.290
Vache.SAU.50	0.006	0.195	-0.331	Vache.SAU.80	-0.167	0.078	-0.332
Vache.SAU.to.50	0.050	0.133	0.005	Vache.SAU.to.80	-0.063	0.198	0.025
Verger.50	0.064	0.050	0.086	Verger.80	0.031	0.082	-0.024
Verger.SAU.50	0.109	0.011	0.080	Verger.SAU.80	0.056	0.068	-0.015
Voiture.50	0.326	-0.042	-0.033	Voiture.80	0.325	0.039	-0.133
Voiture.SAU.50	0.286	-0.067	-0.024	Voiture.SAU.80	0.216	0.028	-0.167
ZoneUrbaine.50	0.323	-0.013	-0.091	ZoneUrbaine.80	0.316	0.059	-0.059
AltitudeMediane	-0.158	-0.200	-0.105	AltitudeMediane	-0.156	-0.236	-0.142
Pentelnf17	0.104	0.267	0.115	Pentelnf17	0.070	0.310	0.090
Position	0.017	0.027	-0.309	Position	0.012	-0.015	-0.147
Relief	-0.089	-0.276	-0.133	Relief	-0.056	-0.298	-0.096
SolDefavorable	-0.013	0.102	-0.152	SolDefavorable	-0.035	0.092	-0.114
JoursPrecipitation	-0.094	-0.133	-0.287	JoursPrecipitation	-0.084	-0.181	-0.178
Jours T>5°C	0.020	-0.058	0.337	Jours T>5°C	0.054	-0.011	0.276

Annexe 5.3

Projection des communes dans le plan défini par les deux composantes principales C2 et C3 des ACP en '50, '60, '80 et '90 (voir ACP (A), Tab.5.4).



Annexe 6.1

Indice d'abondance de lièvres calculé sur 125 communes à partir des statistiques de chasse par zone affermée.

n° commune	Commune	Canton	Indice de lièvres		n° commune	Commune	Canton	Indice de lièvres	
			1980 à 1985 en nb/km2...	...de SAU				1980 à 1985 en nb/km2...	...de SAU
1001	Doppleschwand	LU	1.461	2.137	2761	Aesch (BL)	BL	0.372	0.750
1021	Aesch (LU)	LU	0.381	0.502	2762	Allschwil	BL	0.354	0.947
1022	Altwis	LU	0.763	1.211	2763	Arlesheim	BL	0.623	5.768
1023	Ballwil	LU	0.807	0.988	2764	Biel-Benken	BL	1.248	1.447
1024	Emmen	LU	0.731	1.477	2768	Ettingen	BL	0.238	0.731
1025	Ermensee	LU	0.479	0.908	2769	Münchenstein	BL	0.254	0.864
1026	Eschenbach (LU)	LU	0.989	1.265	2770	Muttenz	BL	0.219	1.285
1027	Gelfingen	LU	0.192	0.263	2771	Oberwil (BL)	BL	0.333	0.505
1028	Hämikon	LU	0.300	0.459	2826	Giebenach	BL	1.348	2.396
1029	Herlisberg	LU	0.486	0.532	2828	Lausen	BL	0.746	2.499
1030	Hitzkirch	LU	0.452	0.623	2829	Liestal	BL	0.485	1.996
1031	Hochdorf	LU	0.361	0.517	2830	Lupsingen	BL	1.099	2.570
1032	Hohenrain	LU	0.550	0.653	2833	Seltisberg	BL	1.233	3.404
1033	Inwil	LU	0.830	1.021	2834	Ziefen	BL	0.434	0.987
1035	Mosen	LU	0.477	0.764	2845	Diepflingen	BL	1.374	11.835
1036	Müswangen	LU	0.290	0.374	2846	Gelterkinden	BL	0.487	1.340
1037	Rain	LU	0.278	0.317	2847	Häfelfingen	BL	0.903	1.411
1038	Retschwil	LU	0.591	0.780	2849	Ittingen	BL	1.264	4.866
1039	Römerswil	LU	0.277	0.327	2850	Känerkinden	BL	2.193	2.650
1040	Rothenburg	LU	0.365	0.488	2852	Läufelfingen	BL	0.670	1.398
1041	Schongau	LU	0.427	0.603	2856	Ormingen	BL	1.084	1.831
1042	Sulz (LU)	LU	0.186	0.283	2857	Rickenbach (BL)	BL	0.867	1.170
1051	Adligenswil	LU	0.239	0.332	2858	Rothenfluh	BL	0.975	2.738
1052	Buchrain	LU	1.744	3.461	2859	Rümlingen	BL	1.085	2.054
1053	Dierikon	LU	0.391	0.551	2861	Sissach	BL	0.940	2.180
1054	Ebikon	LU	1.021	1.911	2862	Tecknau	BL	1.959	7.112
1055	Gisikon	LU	0.450	0.446	2864	Thürnen	BL	0.679	0.957
1056	Greppen	LU	0.603	1.102	2867	Wittinsburg	BL	1.132	1.036
1057	Honau	LU	0.425	0.636	2868	Zeglingen	BL	1.844	3.103
1058	Horw	LU	0.160	0.474	2881	Arboldswil	BL	0.580	1.457
1060	Littau	LU	0.223	0.415	2882	Bennwil	BL	0.720	1.162
1062	Malters	LU	0.405	0.565	2884	Diegten	BL	1.311	2.031
1063	Meggen	LU	0.233	0.440	2885	Eptingen	BL	0.715	1.258
1064	Meierskappel	LU	0.348	0.475	2886	Hölstein	BL	0.377	0.935
1065	Root	LU	1.001	1.793	2888	Langenbruck	BL	0.176	0.315
1067	Udligenswil	LU	0.308	0.474	2889	Lauwil	BL	0.575	1.806
1068	Vitznau	LU	0.153	0.469	2891	Niederdorf	BL	0.810	1.175
1069	Weggis	LU	0.133	0.298	2892	Oberdorf (BL)	BL	0.907	2.293
1081	Beromünster	LU	0.369	0.437	2893	Reigoldswil	BL	0.718	1.347
1083	Buttisholz	LU	0.529	0.665	2894	Titterten	BL	1.027	1.563
1086	Grosswangen	LU	0.592	0.707	2895	Waldenburg	BL	0.163	0.630
1087	Gunzwil	LU	0.417	0.499	4406	Dozwil	TG	0.506	0.615
1088	Hildisrieden	LU	0.210	0.229	4411	Egnach	TG	0.294	0.340
1089	Knutwil	LU	0.353	0.500	4431	Roggwil (TG)	TG	0.171	0.264
1091	Mauensee	LU	0.374	0.499	4436	Romanshorn	TG	0.126	0.270
1092	Neudorf	LU	0.372	0.618	4451	Uttwil	TG	0.130	0.249
1093	Neuenkirch	LU	0.185	0.240	4461	Amriswil	TG	0.198	0.298
1094	Nottwil	LU	0.230	0.266	4486	Hauptwil-Gottshaus	TG	0.149	0.194
1095	Oberkirch	LU	0.300	0.377	4561	Felben-Wellhausen	TG	0.339	0.649
1096	Pfeffikon	LU	0.464	1.235	4566	Frauenfeld	TG	0.179	0.343
1099	Schenkon	LU	0.164	0.204	4646	Ermatingen	TG	0.840	2.394
1102	Sempach	LU	0.160	0.214	4671	Kreuzlingen	TG	0.154	0.861
1103	Sursee	LU	0.465	2.278	4756	Schönholzerswilen	TG	0.383	0.519
1107	Wolhusen	LU	0.803	1.161	4761	Busswil (TG)	TG	0.270	0.466
1126	Ebersecken	LU	0.424	0.511	4781	Wängi	TG	0.154	0.218
1127	Egolzwil	LU	0.182	0.198	4806	Eschenz	TG	0.255	0.496
1128	Ettiswil	LU	0.596	0.777	4831	Müllheim	TG	0.705	1.267
1129	Fischbach	LU	0.438	0.516	4864	Steckborn	TG	0.391	1.512
1131	Grossdietwil	LU	0.538	0.752	4891	Berg (TG)	TG	0.314	0.393
1133	Kottwil	LU	0.452	0.643	4911	Bürglen (TG)	TG	0.332	0.475
1138	Ohmstal	LU	0.650	0.921	4941	Märstetten	TG	0.377	0.539
1143	Schötz	LU	0.225	0.350	4951	Wigoltingen	TG	0.622	0.787
1146	Wauwil	LU	0.269	0.347					
	Moyenne sur:	LU	0.4646	0.7219		Moyenne sur:	BL	0.8420	2.1415
						Moyenne sur:	TG	0.3513	0.6951

Pegase

La méthode d'analyse du paysage Pegase (Partition d'un Ensemble Géographique pour l'Analyse Spatiale Ecologique) est une procédure divisive hiérarchique multivariée basée sur la théorie de l'information. Elle a été développée par Michel Phipps, professeur émérite au Département de Géographie à l'Université d'Ottawa, Canada, dans le but de découvrir le modèle d'organisation écologique du paysage et de mesurer son niveau d'ordre écologique. Ce texte s'inspire presque exclusivement de ses publications, en particulier celle qui présente les fondements théoriques de la méthode (Phipps, 1981). Le but est de donner un aperçu de tous ses travaux et développements, afin de permettre au lecteur de comprendre le fonctionnement de Pegase. Le calcul du succès (voir paragraphe 6) est le seul point de ce texte qui n'est pas tiré des travaux de Phipps.

1 Introduction

Exemple d'application

Prenons, comme exemple, une application de Pegase développée dans (Phipps, 1995), dans laquelle on cherche à mettre en relation la communauté végétale sur une portion d'un paysage situé dans le sud-ouest du Territoire du Yukon (Canada), avec les descripteurs physiques du paysage. La zone d'étude a été découpée en une grille de 812 sites, régulièrement distribués, espacés de 15 mètres. Le système comprend donc 812 unités et 18 variables, dont l'une est la variable cible, parfois appelée variable dépendante (la communauté végétale), les 17 autres étant les variables explicatives, parfois appelées variables indépendantes. Par analogie, imaginons vouloir expliquer, à l'aide d'une analyse par régression multiple, une technique bien connue, une variable cible continue autre que la communauté végétale¹ et les descripteurs physiques du paysage. Le résultat serait une relation du type de cette équation:

$$y = aV_1 + bV_2 + cV_3 + \dots + kV_k + \dots + KV_l + e \quad (1)$$

Avec :

- $N = 812$ le nombre d'unités,
- y la variable cible continue,
- V_k les variables physiques, k allant de 1 à l , l étant égal à 17 dans cet exemple : Altitude relative, Mésorelief parallèle, mésorelief transversal, microrelief, pente, orientation, pergélisol, drainage station, mottling, drainage sol, rochosité, cendre volcanique, texture Ah, matériel parental, contexte géomorphologique, matériel pierreux.
- e l'erreur.

¹ Rappelons que la variable cible d'une régression multiple ne peut être nominale.

Dans notre exemple, la variable cible (la communauté végétale) est catégorielle. Chaque unité peut être dans un état a_j , j allant de 1 à m , m étant égal à 5 dans cet exemple: Pessière dense, pessière ouverte, tremblaie, pelouse à armoise et pelouse à chaméphytes. Ceci rend une analyse par régression multiple impossible, et nous amène à utiliser Pegase.

Pegase fonctionne selon un algorithme basé sur la théorie de l'information: les variables explicatives sont sélectionnées selon leur capacité à réduire l'entropie du système, alors que dans une régression multiple, elles seraient sélectionnées selon leur capacité à minimiser le carré des erreurs. Ces deux méthodes mènent à des résultats différents et cependant complémentaires.

Intérêt d'une telle étude.

Une des questions fondamentales en écologie du paysage est de savoir comment associer les systèmes écologiques avec la structure du paysage. Plus précisément, il s'agit de comprendre comment les aspects biologiques et physiques interagissent pour faire apparaître une structure dans le paysage. Ce thème a fait l'objet de nombreuses recherches durant ces dernières dizaines d'années.

Pegase a été développé pour répondre à cette question, mais son auteur ne s'est pas limité à chercher à expliquer la configuration spatiale du paysage. Il a essayé d'exprimer la variation corrélée entre l'utilisation d'un paysage (ou dans l'exemple d'introduction la communauté végétale) et d'autres caractéristiques du même paysage: Pegase permet de découvrir le modèle d'organisation écologique du paysage et de mesurer son niveau d'ordre écologique. Le résultat de l'analyse devrait aider l'ingénieur à prendre des décisions avec un minimum de risques, alors qu'un grand nombre de facteurs entrent en jeu. Il faut encore préciser que Pegase n'est pas à proprement parler un modèle spatial: il ne tient pas compte du voisinage comme un modèle de type Automate Cellulaire par exemple. La position des unités étant connue, il permet de visualiser les variables et les résultats de l'analyse sur une carte et d'en déduire des regroupements, voire d'analyser la structure dessinée par les unités avec la même organisation du paysage avec un outil tel que Fragstat (McGarigal & Marks, 1995).

Dans le domaine de l'analyse du paysage, deux problèmes se posent: d'une part les caractéristiques biologiques, pédologiques, physiques, spatiales, etc., qui sont souvent des variables catégorielles (nominales ou ordinales); d'autre part, le nombre de variables explicatives ainsi que le nombre de sites d'échantillonnage (unités) peuvent être très importants. Pegase a été développé en tenant compte de ce besoin: il permet de traiter un très grand nombre de données, qui peuvent être continues ou catégorielles. Une autre qualité de Pegase est sa grande souplesse lors de son utilisation: l'utilisateur peut, pour les besoins d'autres analyses sélectionner une autre variable cible et peut, de la même façon écarter de l'analyse une variable particulière. Il peut également regrouper les classes des variables, lorsqu'il estime qu'elles ne regroupent pas un nombre suffisant d'unités.

Pegase peut aussi être utilisé pour expliquer des caractéristiques du paysage, autres que la végétation ou l'utilisation du sol, par exemple l'identité ethno-linguistique (Phipps et al., 1994). Dans cette application, les variables explicatives ne sont pas de nature biologiques, pédologiques, physiques ou spatiales, mais économiques, sociologiques, esthétiques et décoratives (Phipps et al.,

1994). Les différentes applications de Pegase ont mené à des extensions du modèle initial, que nous présentons brièvement à la fin de cette annexe.

2 Historique

Les termes d'hétérogénéité, de diversité et d'organisation spatiale du paysage, ainsi que d'ordre et de désordre dans le paysage, sont apparus, il y a longtemps déjà, dans les années 1960. De nombreuses applications des années 1970 reposaient, implicitement ou explicitement, sur l'existence de modèles de relations abiotiques-biotiques, comme, par exemple, les systèmes de classification écologique des terres (Mabbutt, cité dans (Phipps, 1995)). L'analyse du paysage se faisait en utilisant ces notions, alors que leurs fondements théoriques étaient peu solides et leurs modes opératoires mal définis. L'application de ces concepts était rendue difficile en raison de ces faiblesses.

L'avènement de techniques nouvelles comme la télédétection satellitaire à partir des années 1970 et les systèmes d'information géographique par la suite a permis d'accroître la quantité d'information et la capacité de manipulation d'information. Par contre, Phipps souligne le fait que ces nouvelles techniques n'ont pas fait progresser les capacités d'analyse: "Nos concepts d'évaluation et de potentiel agricole n'ont pratiquement pas changé" (Phipps, 1995). Il était donc nécessaire de consolider les fondements théoriques. Pegase a été développé afin d'offrir un mode opératoire basé sur ces théories d'analyse du paysage.

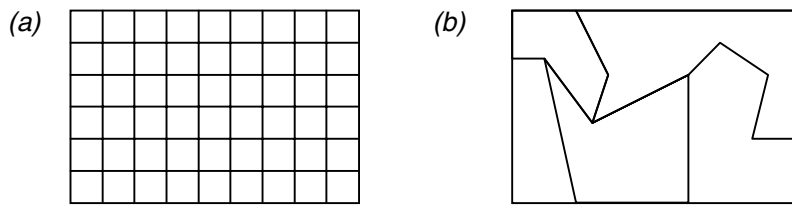
D'autres modèles d'analyse de base de données relationnelles utilisant également la théorie de l'information ont été développés parallèlement à Pegase (Thompson & Thompson, 1986).

3 Fondements théoriques

Pegase s'appuie sur la théorie des **systèmes discrets ou distribués** et la **théorie de l'information**. Il cherche à mettre en œuvre le concept d'ordre - ou organisation - dans un paysage et à en donner une mesure. L'algorithme est basé sur le concept suivant: de nouvelles hypothèses sur le paysage sont définies, puis mises en œuvre et finalement vérifiées expérimentalement par la mesure de l'ordre.

Les **systèmes discrets** ont souvent été décrits comme intéressants pour simuler un espace géographique: ils permettent d'attribuer et de combiner de façon variable les informations et les fonctions de relations sur les unités spatiales qui constituent le paysage. Les unités spatiales peuvent être uniformes, régulières, on parle alors d'un système cellulaire uniforme ou régulier (Fig.A 6.2.1). 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, géomorphologique, pédologique ou politique par exemple. Dans les deux cas, le système doit contenir un nombre d'unités important pour qu'il soit possible de découper des classes présentant un type commun de relation. A chaque unité spatiale sont associés des descripteurs, abiotiques, biotiques ou autres, qui la caractérisent. L'ensemble des unités constitue l'échantillon, décrivant le système étudié.

Fig. A 6.2.1: Système cellulaire (a) uniforme ou régulier et (b) irrégulier.



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'information entre écosystèmes (messages allant d'une unité spatiale à une autre) ou, par analogie, du milieu abiotique au milieu biotique (Baudry & Burel, 1985). La notion d'information permet à la fois une étude quantitative et globale, sans nécessiter une connaissance fine des mécanismes de fonctionnement du paysage. Dans le cas de la recherche de l'organisation dans le paysage, c'est une version thermodynamique de cette théorie, inspirée des travaux de L. Boltzmann, qui peut être utilisée. Le formalisme et les outils mathématiques apportés par cette théorie permettent d'atténuer la subjectivité, sans pourtant que les contraintes du systèmes ne soient exprimées par des expressions mathématiques complexes. Les outils mathématiques sont les suivantes :

A) *L'entropie* d'information, 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. Reprenons l'exemple de l'introduction: Le système est caractérisé par la communauté végétale. Appelons-la variable cible U. L'entropie du système est donnée par l'expression suivante, aussi connue sous le nom de Formule de Shannon:

$$H(U) = - \sum_{j=1}^m p_j \ln p_j \quad (2)$$

avec p_j la probabilité que l'état de cette variable cible de l'unité spatiale observée soit a_j , $j=(1, m)$. Lorsque le système est constitué d'un nombre fini d'unités, comme ici de N cellules ($N=812$), on peut compter le nombre d'occurrences de la variable cible dans chaque état : f_j est la fréquence d'occurrence de la j ème utilisation du sol. Ainsi, l'entropie du système peut aussi s'écrire:

$$H(U) = \frac{1}{N} \left[N \ln N - \sum_{j=1}^m f_j \ln f_j \right] \quad (3)$$

En effet, la probabilité d'occurrence peut être remplacée par la fréquence d'occurrence relative, par exemple p_j par $\frac{f_j}{f_{tot}}$ ou $\frac{f_j}{N}$. Pour la démonstration de l'équivalence des équations 2 et 3, voir (Phipps,).

L'entropie du système peut aussi se calculer à la fin de la procédure de division par Pegase, une fois qu'une contrainte a été introduite dans le système, permettant la réduction du nombre de configurations possibles. La réduction de l'entropie, calculée comme la différence entre l'entropie finale, à posteriori, et l'entropie initiale, à priori, est appelée la *neguentropie*.

Cette notion de réduction d'entropie par introduction d'une ou plusieurs contraintes a été illustrée par (Phipps, 1995) de la façon suivante: "Imaginons un agriculteur occupant une nouvelle ferme divisée en 16 parcelles. Supposons qu'il veuille consacrer 8 parcelles au blé, 6 aux prairies et 2 à d'autres cultures et qu'il ne tienne pas compte des exigences environnementales des cultures qu'il désire faire ; ceci l'amènera à choisir au hasard les parcelles affectées aux trois cultures. Cette situation lui permet le plus grand nombre de configurations possibles, nombre mesurable par l'entropie de la couverture cultivée. Par contre, s'il a noté que les parcelles bien drainées donnent de meilleurs rendements en blé, il choisira plus probablement d'affecter à cette culture les parcelles ayant une légère pente, laissant, par la même occasion plus d'espace aux prairies en terrain mal drainé. A partir de ce moment, l'agriculteur tient compte de la contrainte de drainage." Cette contrainte entraîne une réduction du nombre de configurations possibles, réduction qui est mesurable par la néguentropie.

B) *L'information mutuelle IM* , une première façon d'exprimer la néguentropie, mesure le lien entre la variable cible U et la variable V introduite comme une contrainte. On appellera cette contrainte une variable explicative, parce que, en réduisant l'entropie du système, elle « explique » une partie du système.

$$IM(U, V) = H(U) - H_V(U) \quad (4)$$

Avec $H(U)$ l'entropie à priori selon (2) et $H_V(U)$ l'entropie à posteriori (ou conditionnelle) selon :

$$H_V(U) = \sum_{j'=1}^{m'} \left[p_{j'} \times H_{V_{j'}}(U) \right] = - \sum_{j'=1}^{m'} p_{j'} \left[\sum_{j=1}^m p_{(j|j')} \ln p_{(j|j')} \right] \quad (5)$$

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

Jusqu'ici, nous avons examiné la relation entre une seule variable explicative et la variable cible. Nous allons maintenant considérer un ensemble de variables explicatives V_1, V_2, \dots, V_k dont chaque combinaison issue d'une procédure multivariée dessine un environnement particulier E . L'ensemble des environnements E constitue une contrainte par rapport au nombre de configurations possibles du paysage. Elle permet de réduire l'entropie du système selon:

$$IM(U, E) = H(U) - H_E(U) \quad (6)$$

Avec $H(U)$ l'entropie à priori selon (2) et $H_E(U)$ l'entropie a posteriori (ou conditionnelle) de U , connaissant l'ensemble des environnements E issus de la procédure multivariée:

$$H_E(U) = - \sum_{i=1}^n \left[p_i \times H_{E_i}(U) \right] = - \sum_{i=1}^n \left[p_i \times \sum_{j=1}^m p_{(j,i)} \ln p_{(j,i)} \right] \quad (7)$$

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 .

La signification de la valeur de l'information mutuelle peut être testée par la méthode du test de test log-likelihood, aussi connu sous le nom du critère de Kulback (Kulback, 1959), à partir de la table de contingence contenant les fréquences associées à ces probabilités. Il a été démontré que ce critère tend de façon asymptotique vers la loi du χ^2 :

Soit l'hypothèse H_o : la relation entre U et E est un effet du hasard.

Critère de Kulback : $\xi = (2N * IM(U, E)) \approx \chi^2$ avec $(n-1)(m-1)$ degrés de liberté

Si $\xi \geq \chi^2$, alors l'hypothèse H_o peut être rejetée, on ne peut pas dire qu'il y ait effet du hasard à $x\%$, x étant habituellement choisi à 1 ou 5 (très significatif, resp. significatif), ce qui veut dire que 1 resp. 5 fois sur 100, un tirage aléatoire donnerait une valeur supérieure ou égale à χ^2 . Ceci nous amène à une deuxième possibilité de mesurer la diminution de l'entropie :

C) *Le rapport de signification SR* (Significance Ratio) calculé à partir du critère de Kulback (voir ci-dessus) selon :

$$SR = \frac{2NI(U, V_k)}{\chi_{(m-1)(m'-1)df}^2} \quad (8)$$

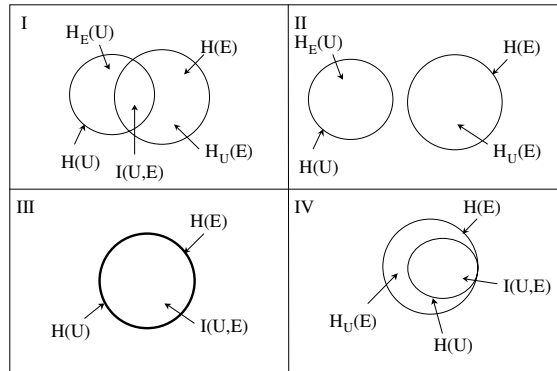
Avec U la variable cible, V_k une des variables explicatives, N le nombre total d'échantillons, m le nombre d'états de la variable cible et m' le nombre d'états de la variable explicative. Par exemple, si $SR = 2$, la variable donne deux fois plus d'information qu'il n'était nécessaire pour qu'elle soit significative.

D) *La redondance R*, l'expression relative de la néguentropie, troisième façon d'exprimer la néguentropie:

$$R_E(U) = \left(\frac{H(U) - H_E(U)}{H(U)} \right) \times 100 \quad (0.9)$$

E) *Le canal d'information*, un concept qui décrit le type de relation existant entre deux informations. Différents cas peuvent se présenter, comme illustré dans la Fig. A 6.2.2.

Fig. A 6.2.2. Différents cas de canal d'information. I : Cas général où E apporte une information, mais laisse encore une entropie $H_E(U)$; II : U et E sont indépendant, l'information mutuelle est nulle ; III : la prédiction est parfaite ; IV : Cas particulier de III, la prédiction est parfaite dans un sens mais pas dans l'autre autrement dit, E est un prédicateur parfait pour U mais U ne suffit pas pour prédire E.



Ces différentes métriques se regroupent ainsi: examiner les types de communautés à travers le canal d'information (donné par l'introduction de contraintes) introduit une négentropie dans le système, c'est-à-dire une réduction d'entropie, dont la mesure est donnée par l'information mutuelle ou la redondance.

Une négentropie maximale, correspondant à une entropie a posteriori minimale, indique que l'organisation du système a été décrite au mieux, que le nombre minimum de configurations possibles est atteint et que le reste de l'organisation visible n'est plus dû qu'au hasard ou à des causes qu'il n'est pas possible d'explicitier avec les données à disposition. Cette organisation de l'espace est le résultat d'un ensemble de contraintes, exercées par plusieurs descripteurs à la fois, dont la combinaison, inconnue a priori, sera découverte par l'algorithme d'analyse Pegase.

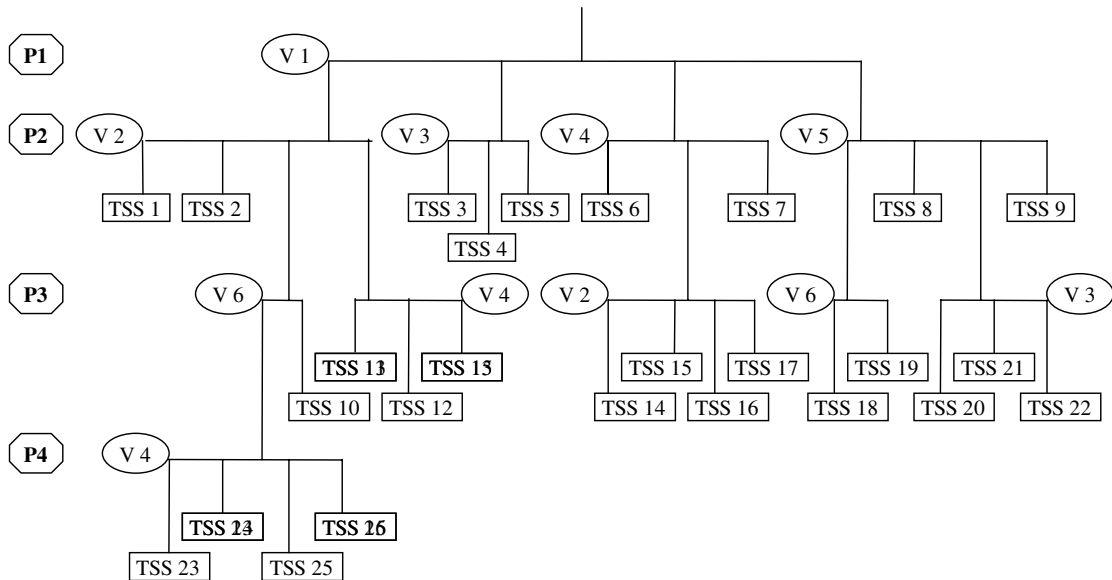
4 Procédure

Pegase fonctionne sur la base d'un algorithme divisif, hiérarchique et multivarié, où l'ensemble des unités est divisé progressivement par étapes, ici appelées paliers, en sous-ensembles significatifs (Fig. A 6.2.3). A chaque palier, les sous-ensembles sont de mieux en mieux définis par les variables explicatives.

Dans un premier temps, Pegase détermine quelle variable, parmi les variables explicatives à disposition, permet de réduire l'entropie initiale au maximum, selon un des trois critères IM , SR ou R . Cette variable est appelée variable divisive. Le paysage est alors découpé en zones qui rassemblent les unités cette variable divisive prend la même valeur. Sur chacune de ces zones, on aura une probabilité différente d'être en présence d'une certaine valeur de la variable cible. On a donc introduit une contrainte dans le paysage, créé un ordre et réduit le nombre de configurations possibles de la variable cible. Reprenons l'exemple de l'agriculteur, avec ses 16 parcelles, cité plus haut : L'introduction de la contrainte "drainage" induit une réduction du nombre de possibilités de combinaison des deux types de cultures, autres que le blé, sur les parcelles mal drainées. Le paysage est alors plus ordonné.

Dans une deuxième phase, le même processus de division de l'espace est mené dans chacune de ces zones, c'est-à-dire pour chacun de ces sous-échantillons. 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, évidemment pas être utilisée deux fois dans une même arborescence (cheminement le long des embranchements, depuis l'échantillon initial). 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.

Fig. A 6.2.3 : 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:

- Un sous-ensemble contient moins d'un certain nombre de cellules, nombre minimum en dessous duquel le test de signification statistique n'est plus valable,
- L'entropie d'un sous-ensemble est inférieure à une valeur seuil, la combinaison de variables explicatives qui mène à ce sous-ensemble suffit à déterminer l'état de la variable cible avec une certaine probabilité,
- Aucune variable explicative encore disponible n'exerce de contrainte significative, ce qui peut vouloir dire deux choses: soit que la base de données ne contient pas la variable qui pourrait lever cette indétermination, soit qu'il s'agit véritablement d'une liberté de choix.

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

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

5 Fichier d'entrée

Les paragraphes 5 et 6 (Fichier d'entrée et Résultats) se réfèrent, en grande partie, au manuel opérationnel de Pegase (Phipps, 1994).

Pegase travaille sur la base d'un fichier contenant, sous forme codée, toutes les informations relatives au paysage. On commencera par décrire le paysage en relevant, unité par unité, l'état des différentes variables explicatives du paysage, ainsi que l'état de la variable cible (dans l'exemple donné en introduction : les conditions physiques, resp. la communauté végétale).

Dans ce fichier figure également l'ordre de priorité que l'algorithme doit utiliser dans les cas où deux valeurs du critère de sélection sont ex æquo ($\pm 2.5\%$) lors d'une étape de division d'un sous-échantillon.

Il est également possible de modifier les critères d'arrêt de la procédure : l'effectif minimum et l'entropie minimum requis 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 (communication personnelle de M.Phipps).

L'utilisateur de Pegase peut modifier certains critères du modèle dans les différentes fenêtres qui apparaissent lorsque le programme est activé :

- Critères de sélection :

- a) Information mutuelle IM : critère présente le défaut de favoriser la sélection d'une variable avec un grand nombre de classes (variable longue) parce que ces classes donnent une plus grande quantité d'information.

- b) Rapport de signification SR : A l'inverse de l'information mutuelle, ce critère favorise une variable avec un petit nombre de classes (variable courte).

- c) Information relative IR :

$$IR = \frac{IM(U, V_k)}{H(V_k)} \quad (10)$$

Avec $H(V_k)$ l'entropie de la variable explicative k .

Ce critère IR est celui qui est le mieux fondé en théorie. Les applications de Pegase montrent qu'il donne souvent un meilleur résultat que les deux premiers.

- Nombre de paliers maximum : en plus d'être une sécurité pour que le programme ne tourne pas plus d'un certain temps, c'est en outre une 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.

- Choix de la variable cible parmi les variables à disposition.
- Nombre et choix des variables explicatives à introduire dans l'algorithme.
- Possibilité de regrouper des classes des variables explicatives.
- Trois niveaux de détail du résultat sont possibles: 1. détaillé : une table pour toutes les variables explicatives à chaque palier ; 2. court : une table pour la variables divisive seulement, niveau de détail suffisant pour reconstruire le dendrogramme de la division; 3. résumé : résumé des résultats généraux seulement.
- 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 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.

6 Résultats

Pegase fournit comme résultat un fichier ASCII ainsi que des résultats graphiques.

Dans le premier figurent:

- Les résultats de chaque sous-échantillon créé à chaque palier, c'est-à-dire entre autres :
 - le nombre d'unités constituant le sous-échantillon,
 - la variable divisive sélectionnée,
 - la succession des variables divisives qui ont mené à ce sous-échantillon,
 - les valeurs des critères de division IM , SR et R .
- Un tableau d'occurrence des classes de la variable cible par TSS. A partir de ce tableau, il est possible de calculer la matrice des fréquences des classes de la variable cible par TSS (Tab. A 6.2.1), ainsi que la matrice des probabilités d'occurrence de chaque classe de la variable cible par TSS, calculées selon :

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{f_i} \quad (11)$$

Tab. A 6.2.1 : Tableau des fréquences des TSS par classes de la variable cible a_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).

TSS	Variable cible					
	Classe 1	...	Classe a_j	...	Classe a_m	
1						
...						
TSS_i			f_{ij}			f_i
...						
TSS_n						
			f_j			N

- Le résultat d'une analyse factorielle en correspondance (AFC). Pour plus de théorie à ce sujet, nous renvoyons de lecteur aux ouvrages de statistiques classiques.
- La contribution de chaque variable à la réduction de l'entropie du système.
- La diminution de l'entropie atteinte à chaque palier.
- La spécificité environnementale de chaque classe de la variable cible. C'est une métrique entre 0 et 1. Elle montre dans quelle mesure la présence de cette classe est spécifique, en d'autres termes, dans quelle mesure la présence de cette classe exclut la présence des autres classes. Elle est calculée à partir du tableau condensé des fréquences des TSS par classes de la variable cible, réduit à deux états C*/nonC* (deux colonnes) : une colonne comprenant la classe en question C*, l'autre colonne comprenant le total des autres classes (nonC*). Par définition, c'est la mesure relative de l'information mutuelle par rapport à l'entropie C*/nonC*, donc une valeur comprise entre 0 et 1:

$$SP = \frac{IM(TSS, C^{*+/-})}{H(C^{*+/-})} \quad (12)$$

Avec $C^{*+/-}$ la présence/absence de la classe C*.

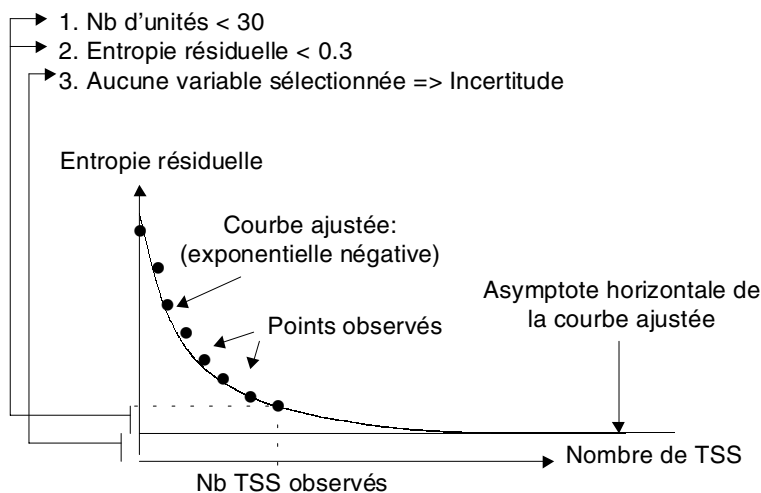
Une spécificité proche de 1 montrerait une situation où chaque ligne de la matrice réduite, tirée de Tab. A 6.2.1, tendrait vers les valeurs [0,1] ou [1,0]. On pourrait dire que C* serait très spécialisé par rapport à l'ensemble des TSS, donc que la division en TSS explique bien la distribution de C*. Une classe dont la spécificité est faible, proche de zéro, est plus ubiquiste et montrerait que la division en TSS ne rend pas compte de la distribution de C*. Nous ne donnerons pas plus de détails concernant le développement mathématique de ce calcul.

- L'entropie initiale, l'entropie finale, la redondance.

- L'entropie ajustée, la néguentropie ajustée et la fonction ajustée $H(U/E) = f(\text{TSS})$. La diminution de l'entropie, en fonction du nombre de sous-échantillons, suit une exponentielle négative avec une certaine qualité de l'ajustement, mesurée par R^2 (Fig. A 6.2.4). Cette fonction d'ajustement admet une asymptote, qu'on définit comme l'entropie finale ajustée, ou entropie résiduelle ajustée, qui montre l'incertitude qui ne peut être levée par le modèle, pour cause de manque de variables adéquates. Un certain 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, rappelons-le), 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. Dans ce cas, il est nécessaire de chercher de meilleurs critères de fonctionnement de Pegase, qui mènent à une situation possible (forme de la fonction, haute qualité de l'ajustement). La différence entre l'entropie finale ajustée et l'entropie finale observée (Fig. A 6.2.4) traduit le fait que le processus de division s'est arrêté avant que toute la néguentropie du système ait pu être révélée en raison, soit d'effectifs trop faibles dans plusieurs sous-ensembles terminaux (première règle d'arrêt), soit d'une valeur seuil de l'entropie résiduelle 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). Dans le cas où le but serait de simuler les valeurs locales de la variable cible, dans les unités où l'on ne possède pas cette valeur, la redondance ajustée n'est pas suffisante puisqu'on ne connaît pas les variables responsables de cette chute au-delà du dernier point observé. Ce qui compte alors c'est la valeur de redondance observée obtenue et les variables explicatives qui sont intervenues tout le long du processus de division.

Fig. A 6.2.4 : Chute d'entropie en fonction du nombre de TSS et courbe ajustée. L'ordonnée du dernier point observé donne la l'entropie résiduelle observée ou empirique, alors que l'asymptote horizontale donne la redondance ajustée.



- 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 des variables explicatives : le nombre de variables divisives (ordre de la branche du dendrogramme) ainsi que le nombre de combinaisons de ces variables augmente 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, 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.
- En plus de ces résultats, nous avons défini une métrique du succès de la capacité de prévision du modèle: le **succès** global d'ordre 0, 1 et 2. Ordre 0 : Pourcentage des unités qui sont bien classées, c'est-à-dire dans la classe la plus représentée par TSS. Ordre 1 : Pourcentage des unités qui sont bien classées d'ordre 1, c'est-à-dire dans la classe la plus représentée par TSS ou dans la classe voisine à la classe la plus représentée. Ordre 2 (voir Fig. A 6.2.5 pour illustration): Pourcentage des unités qui sont bien classées d'ordre 2, c'est-à-dire dans la classe la plus représentée par TSS ou dans les 4 classes voisines (deux de chaque côté) à la classe la plus représentée. Un bon modèle aura un succès d'ordre 1 et 2 seulement légèrement plus grand que le succès d'ordre 0. Le succès peut aussi être calculé pour chaque classe.

Fig.A 6.2.5 : Exemple de calcul de succès d'ordre 2 : la classe S3. Matrice M1 : tiré du tableau d'occurrence des unités par TSS et classes de la variable cible (Tab. A 6.2.1), avec la classe étudiée (encadrée par) et les colonnes considérées pour l'ordre 2 (encadrées par =) ; M2 : sélection des lignes de la colonne S3 sur lesquelles le maximum se trouve dans une des colonnes considérées pour l'ordre 2 ; M3 : colonne S3, avec les valeurs de la matrice M1 dans les lignes sélectionnées dans la matrice M3, les autres lignes recevant la valeur 0.

M1										M2		M3			
TSS	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Total	...	S3	...	...	S3	...
1	7	0	3	3	0	1	0	1	15	...	3	...	...	3	...
2	5	0	1	0	1	1	2	4	14	...	1	...	...	1	...
3	0	3	1	1	2	1	1	0	9	...	1	...	...	1	...
4	1	6	1	3	1	1	1	0	14	...	1	...	...	1	...
5	2	3	0	0	1	3	8	9	26	...	0	...	...	0	...
6	0	1	2	0	2	3	1	0	9	...	2	...	...	0	...
7	0	1	0	0	2	0	0	0	3	...	0	...	...	0	...
8	0	0	1	4	3	2	1	0	11	...	1	...	...	1	...
9	0	0	1	4	3	3	0	0	11	...	1	...	...	1	...
10	2	1	1	0	0	1	0	0	5	...	1	...	...	1	...
11	0	0	5	0	0	1	0	0	6	...	5	...	...	5	...
12	1	1	0	0	1	0	0	1	4	...	0	...	...	0	...
13	0	1	1	2	0	0	1	4	9	...	1	...	...	0	...
14	1	0	2	0	0	0	3	0	6	...	2	...	...	0	...
15	0	1	0	1	0	1	0	0	3	...	0	...	...	0	...
16	0	0	0	0	3	0	0	0	3	...	0	...	...	0	...
Total	19	18	19	18	19	18	18	19	148	...	19	...	...	14	...

Le succès d'ordre 2 de la classe S3 est alors calculé de la façon suivante :

$$A2_{S3} = \frac{\sum_{i=1}^m f_{i,S3(matrice\#3)}}{\sum_{i=1}^m f_{i,S3(matrice\#1)}} * 100 = \frac{14}{19} * 100 = 73.7\% \quad (0.13)$$

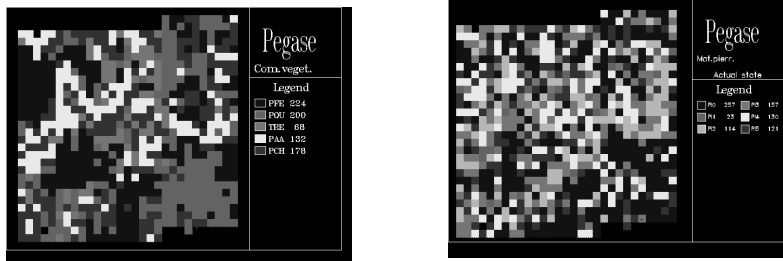
Le succès global est le rapport entre la somme des totaux des colonnes de cette troisième matrice et le nombre total d'unités :

$$A2_{global} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_{ij(matrice\#3)}}{N} \quad (0.14)$$

Des résultats graphiques peuvent être affichés une fois que l'algorithme est terminé :

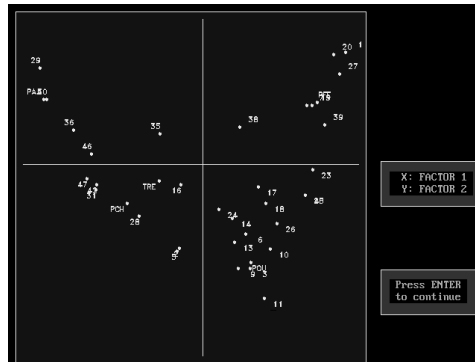
- Les variables cibles et la variable cible peuvent être visualisées par une représentation spatiale du système étudié (Fig. A 6.2.6).

Fig. A 6.2.6 : Représentation spatiale par Pegase de la variable cible (Communauté végétale) et d'une variable explicative (ici : Matériel pierreux).



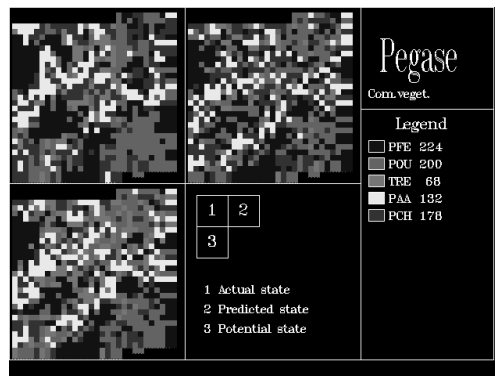
- Une visualisation de la projection des TSS et des classes de la variable cible sur les plans constitués par les axes factoriels le l'AFC, pris deux par deux (Fig. A 6.2.7). Un regroupement de TSS autour d'une classe de la variable cible peut indiquer des conditions favorables à cette classe (ici à un certain type d'utilisation du sol).

Fig. A 6.2.7: Exemple d'analyse factorielle (ici, les TSS et les classes de la variable cible sont projetés sur les axes correspondants aux deux premières composantes (qui expliquent la plus grande partie de la variance)).



- Un état probable de la répartition spatiale de la variable cible peut être simulé à partir de la matrice des probabilités d'occurrence de chaque classe de la variable cible par TSS calculée sur la base du Tableau A 6.2.1.
- Pegase permet également de simuler la distribution spatiale de l'état potentiel de la variable cible. Dans ce cas, la probabilité potentielle est obtenue à partir de la fréquence observée et d'une fréquence théorique ou fréquence attendue, également assujettie aux fréquences f_i et f_j du Tableau A 6.2.1.
- Ces deux simulations peuvent être visualisées à côté de l'état réel (Fig. A 6.2.8) :

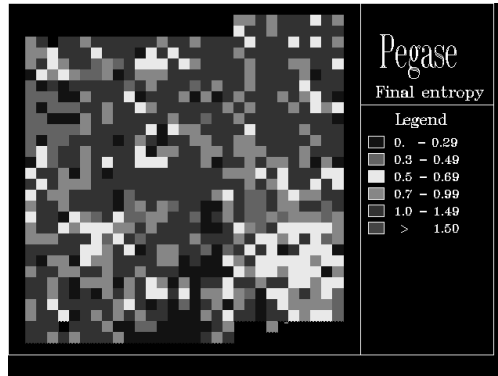
Fig. A 6.2.8 : Etats de la variable cible: 1: réel observé ; 2 : simulé probable; 3 : simulé potentiel.



Si ces deux résultats simulés ressemblent à l'état réel observé, on peut dire que le système et les phénomènes ont été traduits de façon satisfaisante.

- Pegase permet encore de visualiser l'entropie résiduelle (finale) de chaque unité à la fin de la division (Fig. A 6.2.9).

Fig. A 6.2.9 : Entropie résiduelle ou finale



Les applications de Pégase montrent que les classes extrêmes sont souvent bien simulées, au contraire des classes intermédiaires.

7 Evaluation du résultat de la modélisation par Pegase

Le programme de mise en œuvre offre des options permettant d'adapter divers paramètres de l'algorithme aux conditions particulières de chaque application. Ces options concernent essentiellement le critère de sélection des variables divisives, deux des trois conditions d'arrêt de la division (effectif minimum et entropie minimum requis pour subdiviser un sous-ensemble) et le niveau de priorité donné aux variables en cas de valeurs ex-aequo du critère de sélection.

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. Celle-ci tend, au contraire, à augmenter avec la diminution de l'effectif de départ. Dans un cas comme dans l'autre, cependant, se pose la question de l'évaluation des résultats de la procédure. Sur quels critères peut-on s'appuyer pour retenir l'une ou l'autre des solutions obtenues, c'est-à-dire la solution qui expliquera le mieux l'organisation du paysage? Nous retiendrons les critères suivants :

- Le critère le plus important est le rapport $r = \frac{R}{nbTSS}$. En effet, le but de Pegase est de réduire

l'entropie autant que possible, tout en maintenant le nombre de TSS aussi bas que possible, car le nombre de sous-échantillons terminaux (TSS) conditionne le nombre de règles nécessaires pour simuler tous les cas de figure. Un modèle est efficace, mais en même temps simple, lorsque le rapport r est élevé. Le nombre de paliers de division n'est, par contre, pas décisif et ne détermine pas la complexité du modèle.

- Ensuite, et toujours sans entrer plus dans les détails, la spécificité des classes de la variable cible et les succès d'ordre 0, 1 et 2, qui mesurent tous deux la capacité du modèle pour retrouver les classes de la variable cible, lors d'une simulation.
- Finalement, les variables divisives sélectionnées, ainsi que leur contribution à la néguentropie, donnent la signification de chacune de ces variables pour le problème étudié et nous permettent d'interpréter la signification écologique du résultat de l'analyse.

8 Propriétés

- A) Si on définit que l'organisation du pattern des types de la variable cible, ou communauté, v s'explique par les variables $V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_K$, on peut écrire :

$$v = f(V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_K) \quad (15)$$

Cette fonction f est de type multivarié et doit satisfaire, en plus, les deux conditions suivantes :

- Les variables sont toutes transformées en variables catégorielles, ce qui permet de considérer de façon semblable des variables donnant des informations à différentes échelles, donc de mieux exprimer les phénomènes observés, mais ce qui implique aussi une perte d'information dans le cas des variables continues qui doivent être discrétisées dans une étape préliminaire.
- f doit être de nature stochastique pour inclure un degré d'incertitude indispensable. Il faut, en effet, tenir compte du fait que le jeu de variables ne regroupe pas toutes les informations importantes pour expliquer la distribution spatiale des communautés. De plus, la nature de la relation pourrait bien être de type stochastique.

Il ne faut pas oublier qu'un grand nombre de caractéristiques du paysage influencent v . Les effets des jeux V_k de variables peuvent changer, selon leur combinaison, avec les états d'autres caractéristiques qu'on n'a pas pu inclure dans ces jeux pour diverses raisons (échelles différentes, mesures impossibles).

- B) Un grand nombre de variables peut être utilisé : en effet, de par la nature divisive et combinatoire de cette méthode, une corrélation entre les descripteurs n'affectera pas le résultat de la procédure, comme c'est le cas lors d'une analyse par régression multiple classique. On ne choisit donc pas, à priori, les variables à introduire dans Pegase, on les utilise toutes, sans restriction, sans risques de fausser le résultat. Celui-ci montrera quelles variables sont corrélées.
- C) La structure et la distribution des variables n'affectent pas non plus le résultat de Pegase : il n'est pas nécessaire d'assurer la linéarité et la continuité des variables comme avec un modèle de régression multiple.
- D) Les variables continues doivent être discrétisées dans une phase préliminaire. Ceci implique une certaine perte d'informations, mais permet une meilleure interprétation des résultats, en particulier, dans le cas où les classes formées auraient une signification logique par rapport à la

question étudiée. Dans les applications existantes de Pegase, la variable cible est une variable d'état discontinue (par exemple des types de végétation, des types d'utilisation du sol, présence/absence d'un élément), et les variables explicatives, dans le cas où elles seraient continues, sont discrétisées de façon à ce que les classes formées aient une signification (écologique ou logique en fonction du problème étudié), ou, si ce n'est pas possible, de façon équiprobable. Cette dernière option garantit que l'entropie de la variable est à son maximum et que, en conséquence, sa capacité d'explication potentielle de la variable cible est à son plus haut niveau.

- E) Pegase présente trois originalités par rapport à la régression multiple :
- La variable cible peut être nominative et inclure jusqu'à 20 classes.
 - Lors d'un palier intermédiaire, Pegase cherche pour chaque sous-ensemble du palier, la variable divisive qui permet de réduire au maximum l'entropie du sous-échantillon, alors que la régression multiple ne fait pas autant de détails: elle cherche la variable qui permet de minimiser, au maximum, le carré des erreurs de l'ensemble des unités.
 - La variable divisive peut être différente d'un sous-échantillon à l'autre sur un même palier. Une variable divisive ne peut, par contre, évidemment pas être utilisée deux fois dans une même arborescence (cheminement le long des embranchements, depuis l'échantillon initial).
- F) Cette procédure permet de réduire l'entropie d'un système, sans faire recours à une expression mathématique des contraintes du système. Au contraire, elle suit un formalisme mathématique simple (procédure de division de l'échantillon par étapes successives), tout en se basant sur une théorie solide (la théorie de l'information).
- G) L'ordre découvert ne provient pas directement de la configuration spatiale, comme déjà mentionné dans l'introduction, mais de la variation corrélée entre la variable cible et d'autres caractéristiques du paysage (variables explicatives). Il est pourtant possible d'inclure l'information spatiale en travaillant sur une base de données récoltée par échantillonnage sur une subdivision géométrique de l'espace, par exemple une grille régulière ou encore sur un système composé d'unités irrégulières juxtaposées, comme des communes, et localisées par les coordonnées de leur centroïde. Les SIG offrent un outil intéressant pour stocker et visualiser ces données: chaque variable correspond à une couche particulière de la base de données. L'analyse revient donc à une recherche de relations entre plusieurs couches d'informations du SIG, mais selon une combinaison non connue à l'avance, que l'algorithme se chargera de découvrir. Pour cela, l'algorithme mesure la contrainte exercée par chaque variable explicative sur la localisation des types de la variable cible.
- H) Un jeu de données de l'ordre de 1'000 unités est recommandé pour obtenir des résultats raisonnables (Phipps, 1994).
- I) Pegase est une méthode d'analyse, qui aboutit à des combinaisons des variables explicatives menant avec une certaine probabilité à un état de la variable cible. Ces combinaisons peuvent être exprimées sous formes de règles, mais leur utilisation pour « prédire » l'état de la variable cible, sur un nouveau jeu de données, n'est pas inclus dans la version actuelle du programme.

- J) Les résultats de Pegase se prêtent à des analyses complémentaires. En particulier, l'arrangement spatial des communes, selon leur appartenance aux sous-échantillons terminaux (TSS) formés par Pegase, pourrait être étudié. Il s'agirait alors d'analyser la structure du paysage, ce qui pourrait être fait avec un logiciel déjà existant, par exemple Fragstat (McGarigal & Marks, 1995).

9 Applications existantes

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

- Phipps et al. (1986b) et Phipps et al. (1986a) présentent l'analyse d'un paysage rural péri-urbain d'Ottawa de 27'000ha, dans laquelle ils ont cherché comme à expliquer l'utilisation du sol à l'aide d'une quinzaine de variables pédologiques et physiographiques. Dans la première étude, les auteurs ont différencié deux zones, selon leur proximité à un noyau d'urbanisation. Cette analyse a été menée à trois époques différentes. Les métriques H(U), HE(U), R et H(E) de chaque modèle sont comparées, ainsi que les spécificités des classes de leur variable cible respective. Phipps ajoute une interprétation logique de ces valeurs par rapport à ses connaissances des phénomènes et conditions réels du système étudié.
- Phipps (1981) cite l'analyse de l'organisation d'un paysage forestier de 14km² au Québec, effectuée par C.Morin. L'auteur a cherché à expliquer le type de communauté d'arbres à l'aide de 9 variables environnementales (topographiques et pédologiques), sur plus de 1200 échantillons, répartis sur une grille régulière de mailles d'environ 100m.
- Dumanski et al. (1987) présentent l'analyse de trois régions de quelques centaines de milliers d'hectares chacune, correspondant à trois intensités d'utilisation. Tout d'abord, une analyse globale a été effectuée afin de tester l'association spatiale générale entre l'occupation du sol et les conditions physiques (variables pédologiques, physiographiques,...). Ensuite, les données ont été agrégées pour analyser la réponse binaire sol cultivé / sol non-cultivé. Finalement, chaque occupation du sol a été pondérée par l'investissement apporté par unité de surface cultivée et l'analyse globale a été effectuée à nouveau.
- Davis & 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, comme la géologie, l'altitude, la pente, etc. Une des originalités de ce programme est qu'il propose une méthode de discrétisation des données continues en deux classes de façon à maximiser l'information mutuelle (IM) entre la variable à discrétiser et la variable cible. Comme $2(IM)$ est approximativement distribué selon une loi du chi-carré, la procédure de partage de la variable est arrêtée lorsque $2(IM)$ ne dépasse pas un certain niveau de signification choisi ($p < 0,05$).

- (Phipps et al., 1994) présentent l'analyse de deux paysages résidentiels de villages ruraux. L'échantillonnage a été effectué sur quelques dizaines de municipalités de la région de transition linguistique entre le Canada anglophone et le Québec. Les auteurs ont cherché 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). Une des particularités de cette étude est que les unités ne sont pas réparties uniformément, ni par municipalités ni sur l'ensemble de la zone d'étude. La densité de population est d'ailleurs fort variable d'une municipalité à l'autre.
- Phipps (1995) présente l'application de Pegase à un paysage dans le sud-ouest du Territoire du Yukon, découpé en 812 cellules de 15mx15m, sur lequel on a cherché à expliquer la couverture végétale à l'aide de 17 descripteurs physiques.

Pegase et la base de données « Lièvre »

Dans cette annexe, nous comparons quelques essais de Pegase, effectués sur la base de données « Lièvres » avec différentes conditions de départ, données par trois critères. Il ne s'agit pas, à proprement parler, d'une analyse de sensibilité. En effet, les combinaisons des trois critères n'ont pas été testées de façon systématique car nous nous sommes rapidement heurtés aux limites de cette méthode pour notre base de données : Celle-ci ne comprend que 125 communes alors que Phipps (1994) recommande un jeu de données de l'ordre de 1'000 unités pour obtenir des résultats raisonnables.

1 Méthode

La théorie et le fonctionnement de Pegase sont présentés en détail dans l'Annexe 6.2 « Pegase ». Nous donnons ici les choix qui ont été faits pour notre application.

Critère « Discrétisation des variables » : D

Comme, dans notre cas, le nombre d'unités est relativement faible, nous avons décidé d'essayer d'optimiser le fonctionnement de Pegase en veillant à ce que les classes de chaque variable aient un nombre d'unités aussi constant que possible, ce qui garantit que l'entropie des variables est à son maximum et que, en conséquence, leur capacité d'explication potentielle de la variable cible est à son plus haut niveau.

Nous avons discrétisé les variables « Paysage » et la variable « Indice d'abondance de lièvres » selon les 4 schémas suivants :

D2 : Les variables sont discrétisées selon deux classes équiprobables. Pour les variables continues avec 125 valeurs différentes, la classe 1 contient les 63 valeurs inférieures, la classe 2 les 62 valeurs supérieures.

D2.2 : Comme D2, mais la classe 1 contient une valeur de plus (64) et la classe 2 une valeur de moins (61).

D4 : Les variables sont discrétisées selon 4 classes équiprobables. Les variables, avec un nombre de valeurs fini et inférieur à 4, ont été discrétisées en 2 classes (« Agglomération taille »), ou en 3 classes (« Lait » et « JoursT>5°C »).

D8 : Les variables sont discrétisées selon 8 classes équiprobables. Les variables, avec un nombre de valeurs fini et inférieur à 8, ont été discrétisées en 3 classes (« Agglomération taille », « Lait » et « JoursT>5°C »), ou en 4 classes (« Route nationale/SC », « Route nationale/SAU » et « Jours précipitation »).

Dans les 4 cas, la variable binaire « Agglomération appartenance » et la variable cantonale « SubventionAF/SAU », avec trois valeurs, n'ont pas été modifiées.

Critère « Conditions d'arrêt » (nombre d'unités minimal) : R

La division d'un sous-échantillon ne s'effectue pas si le nombre d'unités restant est inférieur à un certain nombre R. Ce sous-échantillon devient un TSS. Nous avons choisi R égal à 8, 2 et 16.

Critère « Ordre de priorité des variables » (O)

L'ordre de priorité n'influence absolument pas la combinaison des variables divisives, sauf dans les cas où deux valeurs du critère de sélection sont ex æquo ($\pm 2.5\%$) lors d'une étape de division d'un sous-échantillon. De manière générale, on remarque que ce cas est relativement rare, et que ce critère n'est pas utilisé dans chaque analyse par Pegase. En général, ce sont les variables les plus importantes pour le problème étudié, ainsi que les variables les plus robustes, qui sont placées en premier (communication personnelle de M.Phipps). Nous avons défini deux ordres de priorité des variables, suivant leur importance pour le lièvre selon Pfister et al. (2002), regroupées en catégories d'influence sur le lièvre (Tab. A 6.3.1) :

O1 : C>M>A>U>G.

O2 : Zone urbaine/SC > SAU/SC > Bâtiment/SC > Route&rail/SAU > Route nationale/SAU > Voiture/SC > Main d'œuvre/SAU > Maïs/to > to/SAU >U>A>C>M>G.

Tab. A 6.3.1 : Les 29 variables, regroupées en 5 catégories d'influences sur le lièvre, adapté du Tab.4.3, chapitre 4 « Base de données paysage ». Les variables avec un * n'ont pas de valeurs communales, mais des valeurs cantonales. Les variables avec un ** sont invariantes dans le temps.

Catégorie	A Agriculture	U Urbanisation et surfaces construites	C Climat	M Morphologie	G Géographie
Variables	<ul style="list-style-type: none"> •Maïs •Verger intensif •Taille moy. parcelles •Vache •Lait * •Main d'œuvre •Tracteur •Subvention AF * •Sol défavorable •Forêt •Surface agricole utile (SAU) •Terre ouverte (TO) 	<ul style="list-style-type: none"> •Agglomération appartenance •Agglomération taille •Agglomération distance •Bâtiment •Population •Voiture •Route&rail •Route nationale •Zone urbaine 	<ul style="list-style-type: none"> •Pluie10 •Jours Précipitation** •JoursT>5°C** 	<ul style="list-style-type: none"> •Altitude médiane** •Relief** •Pente < 17%** 	<ul style="list-style-type: none"> •Position**

Pour évaluer et comparer les modèles créés par Pegase, nous avons choisi les métriques suivantes (décrites en détails dans l'Annexe 6.2 consacrée à Pegase) :

- (a) Entropie initiale $H(U)$: Diversité initiale de la variable cible dans la base de données.
- (b) Redondance $R(E,U)$: Réduction de la diversité de la variable cible relative à sa valeur initiale, connaissant la combinaison des variables explicatives.
- (c) Redondance $R_{aj}(E,U)$ ajustée : Réduction de la diversité de la variable cible théorique, correspondant au cas où la procédure de division n'aurait pas été stoppée par une des conditions d'arrêt.
- (d) Entropie de l'env. $H(E)$: Diversité de la combinaison des variables explicatives.

- (e) Entropie de l'env. H_{aj} (E) ajustée : Diversité théorique de la combinaison des variables explicatives.
- (f) Nb de TSS : Nombre de sous-ensembles terminaux formés pendant de la procédure de division (TSS : Terminal Sub Set).
- (g) Nb de paliers : Nombre de divisions effectuées dans la branche la plus longue.
- (h) Nb de variables divisives : Nombre de variables explicatives qui ont été utilisées comme variables divisives.
- (i) Succès global d'ordre 0, 1 et 2, une valeur entre 0 et 100% exprimant la capacité de prévision du modèle. Le succès d'ordre 0 mesure le pourcentage des unités qui sont bien classées, c'est-à-dire attribuées à la classe la plus représentée par TSS. Le succès d'ordre 1 (resp.2) mesure le pourcentage des unités qui sont bien classées d'ordre 1 (resp.2), c'est-à-dire dans la classe la plus représentée par TSS, ou dans ses deux classes voisines (resp. dans la classe la plus représentée par TSS ou dans ses 4 classes voisines). Un bon modèle aura un succès d'ordre 1 et 2 peu différent du succès d'ordre 0, montrant que les unités de chaque TSS sont en majorité regroupées dans une seule classe. Le succès peut aussi se mesurer pour chaque classe de la variable cible.

- (j) Rapport r entre la redondance R et le nombre de TSS formés : $r = \frac{R}{nbTSS}$: une mesure qualitative

du rapport entre la diminution du désordre par la formation de TSS et la complexité du modèle qui augmente avec le nombre de TSS. Rappelons que le but de Pegase est de réduire l'entropie autant que possible, tout en maintenant le nombre de TSS aussi bas que possible. En effet, le nombre de sous-échantillons terminaux (TSS) conditionne le nombre de règles nécessaires pour simuler tous les cas de figure. Un modèle est efficace, mais en même temps simple, lorsque le rapport r est élevé.

- (k) Rapport r_{aj} entre la redondance ajustée R_{aj} et le nombre de TSS formés : $r_{aj} = \frac{R_{aj}}{nbTSS}$.

- (l) Spécificité de chaque classe de la variable cible : une valeur variant de 0 à 1, qui exprime le degré de dépendance de chaque classe par rapport aux divisions en TSS, et, indirectement, à l'égard des variables sur lesquelles est fondée cette division en TSS. Elle montre dans quelle mesure la présence de cette classe est spécifique, en d'autres termes, dans quelle mesure la présence de cette classe exclut la présence des autres classes.

La relation entre la variable cible « Indice d'abondance de lièvres » et les variables explicatives « Paysage » est bien modélisée lorsque la redondance ajustée est la plus importante et le nombre de sous-échantillons terminaux (TSS) minimum (communication personnelle de Phipps), c'est-à-dire lorsque $r_{aj}=R_{aj}/nbTSS$ est le plus important. Ce critère est essentiel dans notre étude, parce que nous cherchons à comprendre les relations entre les variables, donc à trouver le modèle qui explique le mieux le système, sachant que la division dans notre modèle a du être arrêtée en cours de route pour cause de manque de moyens (faible nombre unités). Dans le cas où le but est de construire un

modèle prédictif qui permettrait de calculer un nombre de lièvres attendu sur une commune, le critère à optimiser serait le rapport $r = R_{\text{réel}} / \text{nbTSS}$. A ce critère r_{aj} , nous ajoutons deux conditions essentielles : la simplicité du modèle (nombre de paliers et nombre de variables divisives) et l'intérêt « écologique » des variables utilisées comme variables divisives. L'entropie de l'environnement, le succès global et la spécificité des classes de la variable cible sont des métriques à utiliser pour étudier de façon plus approfondie les résultats de Pegase, destinés à évaluer le succès et la signification des classes et des sous-ensembles terminaux (TSS) produits.

2 Résultats

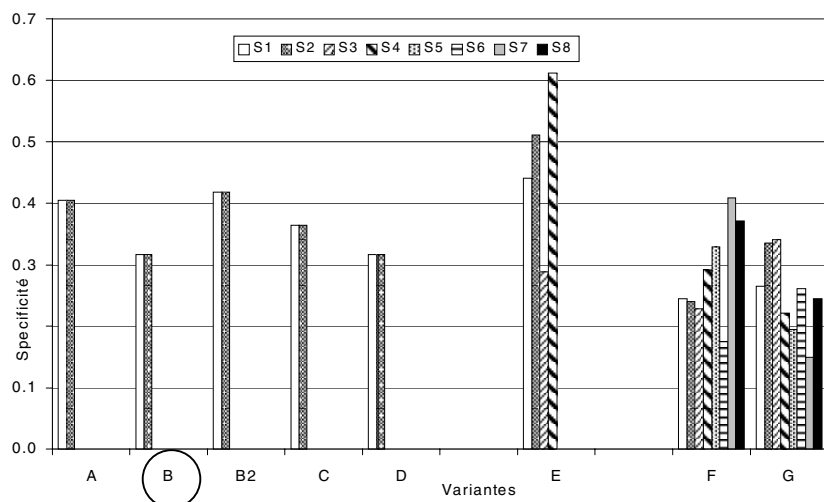
Les résultats des 8 essais d'application de Pegase sur la base de données « Lièvre » (Variantes A à G) sont résumés par les métriques (a) à (j) (Tab. A 6.3.2).

Tab. A 6.3.2 : Comparaison des essais d'application de Pegase sur la base de données « Lièvres », avec différentes conditions de départ données par trois critères (D, R, O). La première colonne est le code de la variante ainsi que le nom de l'essai correspondant. * valeurs non-calculées des variantes qui seront abandonnées à cause d'une R_{aj} irréaliste (>100%). ** mesure de la qualité de l'ajustement de la courbe ajustée. Entouré d'un cercle : la variante qui sera finalement retenue.

Variantes (A-G) et essais correspondants		(a) Entropie initiale H(U)	(b) Redondance R (E,U) (c) [R_{aj} (E,U), r^{2**}]	(d) Entropie de l'env. H(E) (e) [H_{aj} (E), r^{2**}]	(f) Nb de TSS	(g) Nb de paliers	(h) Nb de variable divisives	(i) Succès global d'ordre :			(j) r (k) r_{aj}
								0	1	2	
A	D2;R8;O1	0.693	40.5 [66.5, 0.989]	2.069 [2.750, 0.987]	14	5	7	78.4	100	100	2.89 [4.75]
B	D2;R8;O2	0.693	31.6 [60.5, 0.991]	1.544 [2.161, 0.976]	9	4	6	75.2	100	100	3.51 [6.72]
B2	D2.2;R8;O2	0.693	41.9 [89.5, 0.987]	2.148 [2.843, 0.979]	12	5	9	76.8	100	100	3.49 [7.46]
C	D2;R2;O2	0.693	36.5 [101.4, 0.988]	1.577 [2.222, 0.975]	10	5	7	76.8	100	100	3.65 [*]
D	D2;R16;O2	0.693	31.6 [60.5, 0.991]	1.544 [2.161, 0.976]	9	4	6	75.2	100	100	3.51 [6.72]
E	D4;R8;O2	0.717	51.7 [100, 0.983]	2.872 [3.551, 0.987]	21	4	9	68.8	90.4	97.6	2.46 [*]
F	D8;R8;O1	2.078	35.0 [100.4, 0.999]	2.588 [3.280, 0.999]	17	2	3	*	*	*	2.06 [*]
G	D8;R8;O2	2.078	32.1 [100.4, 0.972]	2.672 [3.308, 0.903]	16	2	2	*	*	*	2.01 [*]

La spécificité (I) des classes de la variable cible pour chaque variante est illustrée dans la Fig. A 6.3.1.

Fig. A 6.3.1 : Spécificité (I) des classes de la variable cible. Entouré d'un cercle : la variante qui sera finalement retenue.



Le but de Pegase étant de déterminer quelles sont les combinaisons de variables qui expliquent l'état de la variable cible, nous avons relevé dans Tab. A 6.3.3 les variables utilisées par chaque variante comme variables divisives, leur contribution à la négentropie (réduction de l'entropie ou du désordre), ainsi que le palier auquel elles apparaissent :

Tab. A 6.3.3 : Contribution à la négentropie des variables divisives en % et par ordre d'apparition (palier). Entouré d'un cercle : la variante qui sera finalement retenue.

Variante	A	B	B2	C	D	E	F	G
discrétisation:	D2	D2	D2.2	D2	D2	D4	D8	D8
Cond.d'arrêt:	R8	R8	R8	R2	R16	R8	R8	R8
Ordre:	O1	O2	O2	O2	O2	O2	O1	O2
Agglom. Distance	10.3	0	0	0	0	0	0	0
Lait	0	0	0	0	0	16.9	0	0
Main d'œuvre/SAU	0	0	0	0	0	0	26.8	0
Mais/SC	10.3	0	0	0	0	16.6	0	0
Mais/SAU	12.8	12.4	10.6	10.7	12.4	0	0	0
Mais/TO	16	0	0	0	0	0	0	0
Pluie10	0	0	0	0	0	7.5	49.9	0
Route&rail/SC	0	0	0	0	0	12.8	0	0
Route&rail/SAU	0	0	0	0	0	9.9	0	0
Route Nationale/SC	0	0	11.6	0	0	0	0	0
SAU/SC	0	13.2	0	11.5	13.2	14.4	0	0
SubventionAF/SAU	14.2	13.3	25.1	11.5	13.3	0	0	0
Terre ouverte/SC	0	0	0	0	0	0	23.3	0
Terre ouverte/SAU	0	0	8.2	0	0	0	0	0
Tracteur/SC	0	0	7	0	0	0	0	0
Vache/SAU	0	16.2	10.5	14	16.2	0	0	0
Vache/(SAU-TO)	0	34.5	6.7	29.9	34.5	6.4	0	0
Verger/SC	0	0	11.6	13.3	0	0	0	0
Pente<17%/SC	25.8	0	8.8	0	0	0	0	56.7
Relief	10.6	0	0	0	0	0	0	0
Sol défavorable/SC	0	0	0	0	0	0	0	43.3
Jours Précipitation	0	0	0	0	0	10.7	0	0
Jours T>5°C	0	10.5	0	9.1	10.5	4.7	0	0

palier 1	SubventionAF/SAU	Vache/(SAU-TO)	SubventionAF/SAU	Vache/(SAU-TO)	Vache/(SAU-TO)	Lait	Pente<17%/SC	Sol défavorable/SC
palier 2	Tracteur/SC Vache/(SAU-TO)	Mais/SAU	Tracteur/SC Vache/(SAU-TO)	Mais/SAU	Mais/SAU	Jours Précipitation Route&rail/SAU Mais/SC	Main d'œuvre/SAU Terre ouverte/SC	Pente<17%/SC
palier 3	Pente<17%/SC Route Nationale/SC Mais/SAU	Vache/SAU SubventionAF/SAU	Pente<17%/SC Route Nationale/SC Mais/SAU	Vache/SAU SubventionAF/SAU	Vache/SAU SubventionAF/SAU	Route&rail/SC SAU/SC Vache/(SAU-TO) Pente<17%/SC		
palier 4	Terre ouverte/SAU Vache/SAU	Jours T>5°C SAU/SC	Terre ouverte/SAU Vache/SAU	Jours T>5°C SAU/SC	Jours T>5°C SAU/SC	Jours T>5°C		
palier 5	Verger/SC		Verger/SC	Verger/SC				

Sur la base de ces résultats, nous pouvons classer les variantes de la façon suivante : La variante B semble être la plus adéquate pour mettre en évidence les variables clés pour le lièvre, avec une redondance ajustée élevée et un faible nombre de TSS ($r_{aj}=R_{aj}/nbTSS=6.72$). D mène au même résultat que B, mais la condition d'arrêt est plus restrictive ($R = 16$ au lieu de 8). B2 aboutit à un r_{aj} plus intéressant (7.46), mais le nombre de communes par classes ($SE1=64$, $SE2=61$) est plus compliqué pour la compréhension intuitive des sous-échantillons « valeurs faibles » et « valeurs élevées » et ne permet pas, en théorie, d'assurer le fonctionnement optimal de Pegase. La variante A est plus complète et finalement C, E, F et G sont à exclure parce qu'elles mènent à une redondance ajustée supérieure à 100%, révélant probablement une erreur dans le fonctionnement de Pegase.

La variante B permet une réduction de l'entropie observée (ou réduction du désordre) de 31.6%. Les 68.4% restant sont dus soit à des variables inconnues, qui ne sont pas dans notre base de données, soit au hasard, soit à un mauvais fonctionnement dû au petit nombre de communes. Cette dernière hypothèse semble confirmée par l'instabilité constatée : en effet, Pegase aboutit à des résultats fort différents suite à des petites modifications des conditions de fonctionnement de la méthode, tel que l'ordre de préférence des variables en cas d'égalité, ou le passage d'un rapport $SE11/SE2=63/62$ à $64/61$ (nombre de communes dans la classe1/classe2). Si l'on exclut cette hypothèse, cette variante B permet de mettre en évidence les 6 variables les plus importantes, utilisées comme variables divisives : 4 d'entre elles sont des variables agricoles (« Vache/SAU-TO », « Maïs/SAU », « Vache/SAU » et « SubventionAF/SAU »), l'une décrit l'occupation du sol (« SAU/SC »), et la dernière le climat (« Jours $T>5^{\circ}C$ »).

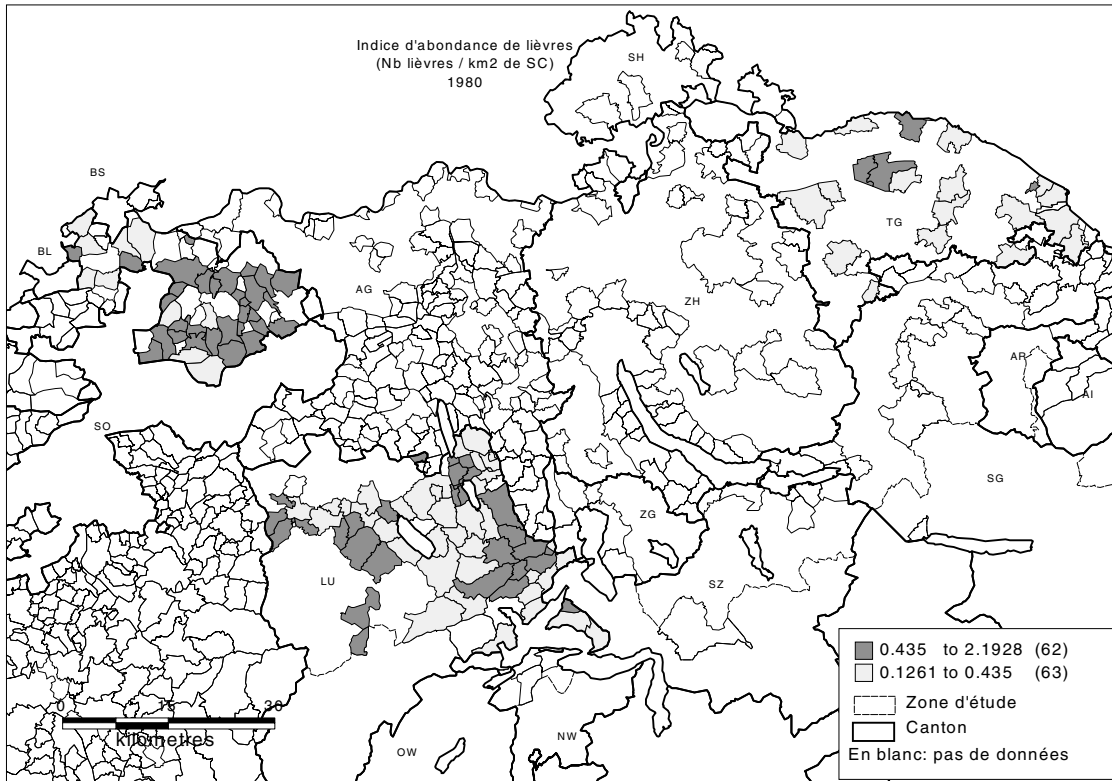
3 Discussion

Le fonctionnement peu stable de Pegase, menant à des résultats peu fiables, dont nous avons ici un exemple, est probablement dû au fait que nous travaillons aux limites du domaine de fonctionnement de ce modèle. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, Phipps (1994) recommande un jeu de données de l'ordre de 1'000 unités pour obtenir des résultats raisonnables. Pour cette raison, nous n'irons pas beaucoup plus loin dans l'interprétation de l'influence relative des trois critères PL, R et O.

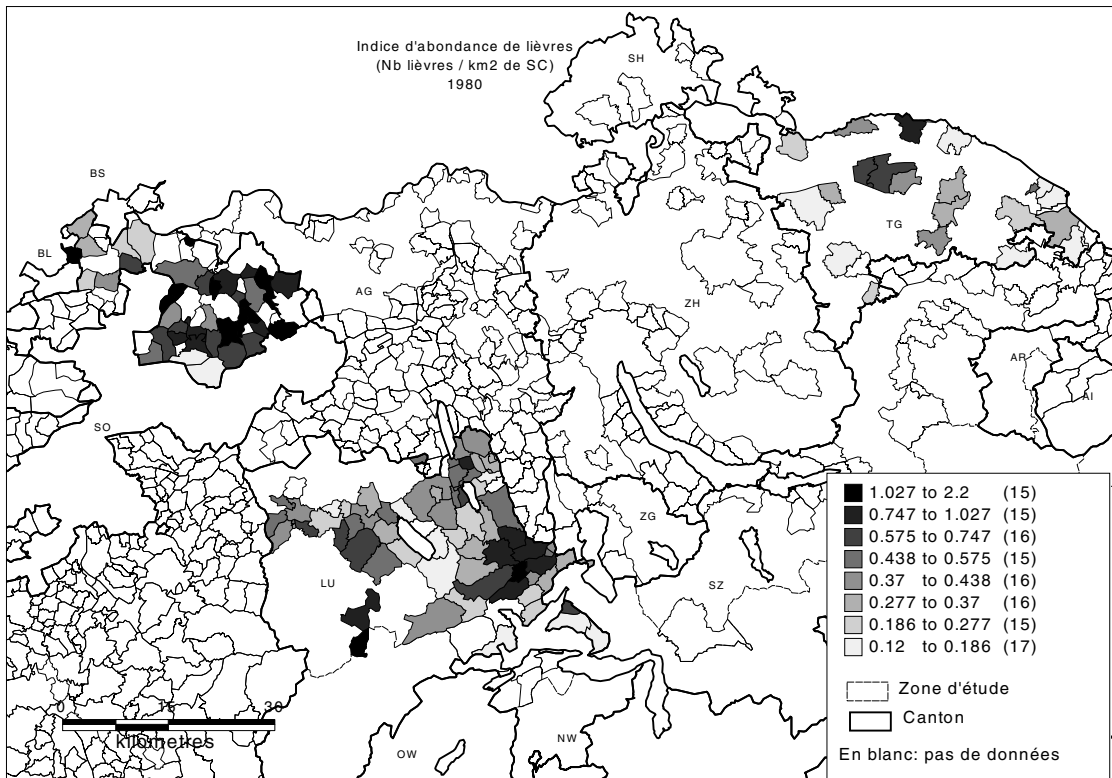
Remarquons que la variante B explique la répartition des lièvres tirés selon une indication binaire « beaucoup/peu » de lièvres abattus. La précision n'est pas toujours signe d'exactitude, mais la perte d'informations peut être importante. En effet, la répartition spatiale de la variable « Indice d'abondance de lièvres », lorsqu'elle est discrétisée selon 2 classes, ne donne pas la même image (appréciation visuelle uniquement) que sa répartition spatiale, lorsqu'elle est discrétisée selon 8 classes (Fig. A 6.3.2) : le canton de Lucerne (LU) serait aussi « peuplé » de lièvres tirés que le canton de Bâle-campagne (BL).

Fig. A 6.3.2 : Répartition spatiale de la valeur calculée « Indice d'abondance de lièvres » à partir des données de la chasse en 1980 sur 125 communes. a) Valeurs distribuées selon 2 classes équiprobables ; b) Valeurs distribuées selon 8 classes équiprobables. (Fonds de carte : OFS GEOSTAT / S+T)

a)



b)



Un modèle de Pegase, basé sur une discrétisation selon deux classes, nous rapproche de la méthode présentée Mankin & Warner (1999). Leur modèle, basé sur l'algorithme CART (Breiman et al., 1984) divise les variables en deux classes, de telle sorte que la variance, à l'intérieur de chaque classe, soit minimisée. (Davis & Dozier, 1990) présente un modèle de classification basé sur la théorie de l'information qui discrétise les variables continues en deux classes, de façon à maximiser l'information mutuelle (IM) entre la variable à discrétiser et la variable cible. Comme 2IM est approximativement distribué selon une loi du chi-carré, la procédure de partage de la variable est arrêtée lorsque 2IM ne dépasse pas un certain niveau de signification choisi ($p < 0,05$). Il existe des méthodes de discrétisation telles que les graphes d'induction (Rakotomalala, 1997), en particulier la méthode Sipina. Ces méthodes sont conçues pour aboutir à un compromis satisfaisant entre les exigences d'explicabilité et d'efficacité, lors de la discrétisation de variables en fonction d'un objectif. Mais l'utilisation de cette méthode Sipina mène à une discrétisation selon un nombre de classes fort différent pour chaque variable, rendant la discussion de la signification « écologique » difficile.

CART va plus loin que Pegase dans l'évaluation du modèle résultant de la division : il permet d'élaguer l'arbre de classification ou régression par un algorithme d'élimination sélective de branches pour produire progressivement un arbre de plus petite taille, puis propose un outil de détermination de l'arbre optimal. Ces deux étapes sont effectivement nécessaires pour utiliser le modèle comme un outil de prévision, ce qui n'est pas le but dans cette étude : Nous cherchons uniquement, dans un premier temps, à déterminer les variables « Paysage » clés pour le lièvre.

Les applications existantes de Pegase ne présentent pas d'étude systématique de sensibilité en fonction de ces 3 critères (D , R et O) : la variable cible est une variable d'état discontinue (par exemple des types de végétation, des types d'utilisation du sol, présence/absence d'un élément), et les variables explicatives, dans le cas où elles seraient continues, sont discrétisées de façon à ce que les classes formées aient une signification (écologique ou logique en fonction du problème étudié), ou, si ce n'est pas possible, de façon équiprobable. Cette dernière option garantit que l'entropie de la variable est à son maximum et que, en conséquence, sa capacité d'explication potentielle de la variable cible est à son plus haut niveau. Les conditions d'arrêt n'auraient pas une influence prépondérante (communication personnelle de M.Phipps). Les applications existantes portent pour la plupart sur l'étude d'un système à une seule époque, comportant un échantillon important (en général plus d'un millier). Phipps et al. (1986) suivent l'évolution d'un même système entre trois époques, en comparant les trois résultats de Pegase avec les métriques Redondance $R(E,U)$, Entropie initiale $H(U)$ et Entropie de l'environnement $H(E)$.

4 Conclusion

La variante B semble la plus performante, avec un rapport (Redondance ajustée/Nb de TSS) élevé. Nous retenons les 6 variables sélectionnées comme variables divisives par Pegase, pour les comparer, dans le chapitre 6 « Le lièvre et le paysage », aux variables clés pour le lièvre déterminées par d'autres méthodes. Parmi elles, 4 sont des variables agricoles (« Vache/SAU-TO », « Maïs/SAU », « Vache/SAU » et « SubventionAF/SAU »), l'une décrit l'occupation du sol (« SAU/SC »), et la dernière le climat (« Jours $T > 5^{\circ}\text{C}$ »).

Cette comparaison de 8 applications de Pegase sur la base de données « Lièvres », souffre de la petite taille du jeu de données (125 communes). Pour cette raison, les essais d'application de Pegase selon différentes valeurs des trois critères (D, R et O) ne peuvent être considérés comme une analyse de sensibilité. Nous en retirons tout de même les informations suivantes, sur la base de la comparaison des résultats de nos 8 applications :

Une discrétisation selon deux classes équiprobables semble permettre le meilleur résultat.

Un minimum de 8 unités semble adéquat comme condition d'arrêt de la procédure de division.

L'ordre de priorité adéquat semble être celui où les variables concernant directement le lièvre sont placées en premier : Zone urbaine/SC > SAU/SC > Bâtiment/SC > Route&rail/SAU > Route nationale/SAU > Voiture/SC > Main d'œuvre/SAU > Maïs/to > to/SAU > Variables Urbanisation et surfaces construites > Variables Agriculture > Variables Climat > Variables Morphologie > Variables Géographie (ordre décroissant).

Annexe 6.5

Régression multiple linéaire entre l'Indice d'abondance de lièvres et les variables « Paysage » peu corrélées de la base de données « Lièvres » (N=125).

A) Stepwise Standard Tolérance=0.01

Multiple R 0.530664
Multiple R² 0.281605
Adjusted R² 0.218588
F(13,111) 4.468701
p 0.000026
Std.Err. of Estimate 0.360856

	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(112)	p-level (<0.05)
Intercept			0.687751	1.030245	0.66756	0.505764
AgglAppartenance 80	0.032573	0.101135	0.032183	0.099923	0.32207	0.747987
Lait 80	-0.152372	0.112853	-0.000315	0.000233	-1.35018	0.179632
TailleParcelle 80	-0.136081	0.09938	-0.000334	0.000244	-1.36931	0.173595
TerreOuverte/SAU 80	0.052458	0.116296	0.141746	0.314243	0.45107	0.652794
Tracteur/SAU 80	0.03027	0.088003	0.002167	0.0063	0.34397	0.731504
Verger/SAU 80	0.037473	0.10331	0.000069	0.000191	0.36272	0.717484
Voiture/SAU 80	-0.192794	0.100278	-0.000128	0.000067	-1.9226	0.057025
Pentelnf17	-0.050194	0.153221	-0.000774	0.002364	-0.32759	0.743821
SolDefavorable	-0.003468	0.107573	-0.000104	0.003214	-0.03224	0.97434
JoursTsup5	0.491296	0.127225	0.008685	0.002249	3.86163	0.000187

B) Stepwise Forward, F to enter=1, F to remove=0 Tolérance=0.01

Multiple R 0.52779
Multiple R² 0.27856
Adjusted R² 0.25451
F(6,118) 11.58346
p 0
Std.Err. of Estimate 0.35246

	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(112)	p-level (<0.05)
Intercept			0.497099	0.853285	0.58257	0.561275
JoursTsup5	0.506622	0.087816	0.008956	0.001552	5.76914	0
Voiture/SAU 80	-0.188736	0.080756	-0.000125	0.000054	-2.3371	0.021091
TailleParcelle 80	-0.158508	0.089064	-0.000389	0.000218	-1.7797	0.077656
Lait 80	-0.131406	0.088515	-0.000271	0.000183	-1.48457	0.140281

C) Stepwise Forward, F to enter=2, F to remove=0 Tolérance=0.01

Multiple R 0.50359
Multiple R² 0.2536
Adjusted R² 0.24136
F(5,119) 20.72564
p 0
Std.Err. of Estimate 0.35556

	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(112)	p-level (<0.05)
Intercept			-0.911163	0.235814	-3.86391	0.00018
JoursTsup5	0.513318	0.080302	0.009074	0.00142	6.39231	0
Voiture/SAU 80	-0.176258	0.080302	-0.000117	0.000053	-2.19493	0.030061

Annexe 7.2

Matrice de corrélation entre les variables de la base de données "Paysage clé" à l'état à chaque décennie (1950, 1960, 1970 et 1990) et les différences avec la décennie suivante ($\Delta 50-60$, resp. $\Delta 60-70$ et $\Delta 70-80$).

Test de signification : Valeur min en dessus de laquelle on peut rejeter l'hypothèse de non-corrélation: $r=0.0842$ ($\alpha=1\%$, $N=936$, n.d.d.l.=934). Les zones donnant les corrélations entre les valeurs à une décennie et les différences avec la décennie suivante sont marquées par un fond gris clair. Les corrélations avec un coefficient $|r|>0.5$ sont marquées par un fond gris foncé. Les corrélations non-significatives sont indiquées par un -.

1950		8	10	12	19	20	21	25	28	32	35	38	40	8'	10'	12'	19'	20'	21'	25'	28'	32'	
MainDoeuvre/SAU 50	8	1.00	-	-	-	-	-0.09	0.44	-	-	-	-	-	-0.47	-0.13	-	-	-	-0.15	0.09	-	-	-
Mais/SAU 50	10	-	1.00	-0.20	-	-	-	-	0.15	0.14	0.16	-	0.13	-	-0.25	-	-	-	-	-	-0.11	0.14	-
Pluie10 50	12	-	-0.20	1.00	-	-	0.23	-	-	-0.10	-0.17	0.13	-0.28	-	-0.16	-	-	-	-	-0.14	-	-0.10	-
SAU/SC 50	19	-	-	-	1.00	-	0.22	0.12	-	-0.18	0.39	0.16	-0.16	-	-	-	-	-	-0.11	-0.10	0.12	-0.21	-
SubventionAF/SAU 50	20	-	-	-	-	1.00	-0.09	0.17	-	-	-	0.13	-0.27	0.12	-	-0.09	-	-0.97	-	-0.10	-0.20	-	-
TailleParcelle50	21	-0.09	-	0.23	0.22	-0.09	1.00	-	-	-	-	0.14	-0.30	0.09	-0.10	-	-	0.10	0.20	-0.20	-	-	-
Tracteur/SAU 50	25	0.44	-	-	0.12	0.17	-	1.00	-	-	-0.09	0.09	-0.17	-0.09	-	-	-	-0.18	-0.15	-	-	-	-
Vache/(SAU-TO) 50	28	-	0.15	-	-	-	-	-	1.00	0.19	0.17	-	-	-	-0.17	-	-	-	-	-	-0.96	0.17	-
Voiture/SAU 50	32	-	0.14	-0.10	-0.18	-	-	-	0.19	1.00	-	-	-	-	-0.10	-	-	-	-	-	-0.22	0.98	-
Pente<17/SC	35	-	0.16	-0.17	0.39	-	-	-0.09	0.17	-	1.00	0.22	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-	0.09
SolDefavorable/SC	38	-	-	0.13	0.16	0.13	0.14	0.09	-	-	0.22	1.00	-0.21	-	-	-	-	-0.13	-	-	-	-	-
JoursT>5°C	40	-	0.13	-0.28	-0.16	-0.27	-0.30	-0.17	-	-	-	-0.21	1.00	-0.12	-	-	-	0.28	-	-	-	-	-
MainDoeuvre/SAU $\Delta 50-60$	8'	-0.47	-	-	-	0.12	0.09	-0.09	-	-	-	-0.12	1.00	0.10	-	-	-0.10	-0.11	-	0.15	-	-	-
Mais/SAU $\Delta 50-60$	10'	-0.13	-0.25	-	-	-	-0.10	-	-0.17	-0.10	-	-	0.10	1.00	-0.10	-	-	-	-	-	-	0.11	-0.09
Pluie10 $\Delta 50-60$	12'	-	-	-0.16	-	-0.09	-	-	-	-	0.10	-	-	-0.10	1.00	-	0.09	-	-	-	-	-	-
SAU/SC $\Delta 50-60$	19'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.10	-	-	-	1.00	-	-	-	-0.19	-	-	-
SubventionAF/SAU $\Delta 50-60$	20'	-	-	-	-	-0.97	0.10	-0.18	-	-	-	-0.13	0.28	-0.11	-	0.09	1.00	-	-	-	-	-	-
TailleParcelle $\Delta 50-60$	21'	-0.15	-	-	-0.11	-	0.20	-0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-0.10	-	-	-	-	-
Tracteur/SAU $\Delta 50-60$	25'	0.09	-	-0.14	-0.10	-	-0.20	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-	-0.19	-	-0.10	1.00	-	-	0.09
Vache/(SAU-TO) $\Delta 50-60$	28'	-	-0.11	-	0.12	-	-	-	-0.96	-0.22	-	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-	1.00	-0.20	-
Voiture/SAU $\Delta 50-60$	32'	-	0.14	-0.10	-0.21	-	-	-0.17	0.98	0.09	-	-	-	-	-0.09	-	-	-	-	-0.09	-0.20	1.00	-
1960 et $\Delta 60-70$		8	10	12	19	20	21	25	28	32	35	38	40	8'	10'	12'	19'	20'	21'	25'	28'	32'	
MainDoeuvre/SAU 60	8	1.00	-	-	-	-	-0.09	0.47	0.15	-	-0.10	-	-0.12	-0.86	-0.11	-	-	-	-0.16	0.18	-	-	-
Mais/SAU 60	10	-	1.00	-0.19	-	-	-	-	-0.09	-	-	-	0.13	-	0.20	0.14	-	0.20	-	-0.23	-	-	-
Pluie10 60	12	-	-0.19	1.00	-	-	0.20	-	-	-0.09	-0.14	0.16	-0.26	-	-0.18	-0.12	-	-	-	-	-	-	-0.09
SAU/SC 60	19	-	-	-	1.00	-	0.09	-	0.47	-0.21	0.38	0.17	-0.14	0.11	-	-0.18	-0.09	0.09	-	0.17	0.24	-0.22	-
SubventionAF/SAU 60	20	-	-	-	-	1.00	0.10	-0.12	-	0.14	-	-	0.10	0.09	-	-0.16	0.08	-0.29	-	-	-	-	0.16
TailleParcelle 60	21	-0.09	-	0.20	0.09	0.10	1.00	-0.24	-	-	-0.09	-	-0.22	0.14	-0.12	-0.18	0.21	-	-0.28	-	-0.12	-	-
Tracteur/SAU 60	25	0.47	-	-	-	-0.12	-0.24	1.00	0.21	-	-	-	-0.11	-0.42	-	-	-0.15	-	-0.15	-0.16	-	-	-
Vache/(SAU-TO) 60	28	0.15	-0.09	-	0.47	-	-	0.21	1.00	-	0.51	0.18	-0.20	-	0.15	-0.19	-0.11	-0.13	-0.15	0.18	0.15	-	-
Voiture/SAU 60	32	-	-	-0.09	-0.21	0.14	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-0.18	-0.14	-0.09	-0.17	0.91	-
Pente<17/SC	35	-0.10	-	-0.14	0.38	-	-0.09	-	0.51	-	1.00	0.22	-	0.16	0.22	-	-0.15	-	-	-	0.21	0.09	-
SolDefavorable/SC	38	-	-	0.16	0.17	-	-	-	0.18	-	0.22	1.00	-0.21	-	0.09	-	-	-	-	-	-	0.10	-
Jour T>5	40	-0.12	0.13	-0.26	-0.14	0.10	-0.22	-0.11	-0.20	-	-	-0.21	1.00	-	-	-	0.34	-	-0.10	-	-	-	-
MainDoeuvre/SAU $\Delta 60-70$	8'	-0.86	-	-	-	0.11	0.14	-0.42	-	-	0.16	-	1.00	-	-0.12	-	-	-	-	-	0.17	-	-
Mais/SAU $\Delta 60-70$	10'	-0.11	0.20	-0.18	-	-	-0.12	-	0.15	-	0.22	0.09	-	1.00	-	-	-	-	-	-0.11	0.24	-	-
Pluie10 $\Delta 60-70$	12'	-	-0.14	-0.12	-0.18	-0.16	-0.18	-	-0.19	-	-	-	-	-0.12	-	1.00	-	-	0.09	-0.10	-	-	-
SAU/SC $\Delta 60-70$	19'	-	-	-	-0.09	0.08	0.21	-0.15	-0.11	-	-0.15	-	-	-	-	-	1.00	-	0.10	-0.22	-	-	-
SubventionAF/SAU $\Delta 60-70$	20'	-	0.20	-	0.09	-0.29	-	-	-0.13	-0.18	-	-	0.34	-	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-0.19
TailleParcelle $\Delta 60-70$	21'	-0.16	-	-	-	-	-0.28	-0.15	-0.15	-0.14	-	-	-	-	-	0.09	0.10	1.00	-0.12	-	-	-0.12	-
Tracteur/SAU $\Delta 60-70$	25'	0.18	-0.23	-	0.17	-	-	-0.16	0.18	-0.09	-	-	-0.10	-	-0.11	-0.10	-0.22	-	-0.12	1.00	0.08	-	-
Vache/(SAU-TO) $\Delta 60-70$	28'	-	-	-	0.24	-	-0.12	-	0.15	-0.17	0.21	0.10	-	0.17	0.24	-	-	-	-	0.08	1.00	-0.19	-
Voiture/SAU $\Delta 60-70$	32'	-	-	-0.09	-0.22	0.16	-	-	-	0.91	0.09	-	-	-	-	-	-	-0.19	-0.12	-	-0.19	1.00	-

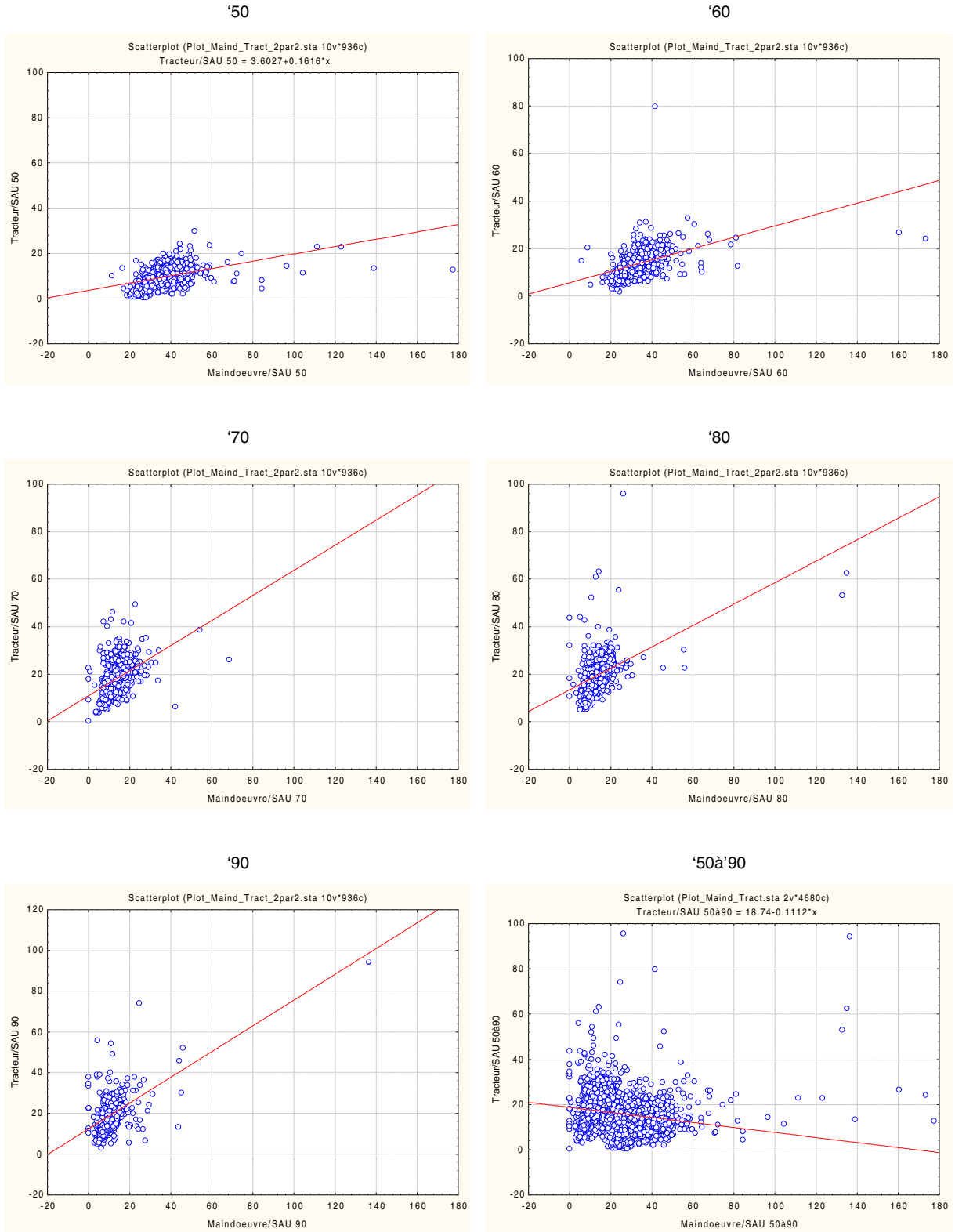
Annexe 7.2

(suite)

1970 et Δ70-80		8	10	12	19	20	21	25	28	32	35	38	40	8'	10'	12'	19'	20'	21'	25'	28'	32'
MainDoeuvre/SAU 70	8	1.00	-0.12	-	0.28	-0.09	-	0.44	0.36	0.10	-	0.08	-0.14	-0.17	-	-	-	0.32	-	-	-0.13	0.16
Mais/SAU 70	10	-0.12	1.00	-0.19	-	-	-0.13	-	0.21	-	0.22	-	0.09	-	-0.10	-	-	-0.11	-	-	-	-
Pluie10 70	12	-	-0.19	1.00	-	-	0.18	-	-0.12	-0.09	-0.15	0.14	-0.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SAU/SC 70	19	0.28	-	-	1.00	-	0.18	-	0.43	-0.23	0.30	0.15	-0.14	-0.13	-	-	-	-	-	-	-	-0.11
SubventionAF/SAU 70	20	-0.09	-	-	-	1.00	-	-0.09	-0.10	-0.15	-	-	0.38	-	-	-0.32	-	-0.66	-	-0.09	-	-0.11
TailleParcelle 70	21	-	-0.13	0.18	0.18	-	1.00	-0.37	-0.10	-	-0.09	-	-0.20	-	-0.10	0.09	-	-0.50	0.09	-	-	-
Tracteur/SAU 70	25	0.44	-	-	-	-0.09	-0.37	1.00	0.26	-	-	-	-0.16	-0.13	-	-	-	0.27	0.13	-0.29	-0.12	-
Vache/(SAU-TO) 70	28	0.36	0.21	-0.12	0.43	-0.10	-0.10	0.26	1.00	-0.17	0.50	0.19	-0.17	-0.18	0.28	0.09	-	0.35	0.11	-	-0.18	-0.11
Voiture/SAU 70	32	0.10	-	-0.09	-0.23	-0.15	-	-	-0.17	1.00	0.09	-	-	0.55	-	-	-	-	-	0.45	-	0.81
Pente<17/SC	35	-	0.22	-0.15	0.30	-	-0.09	-	0.50	0.09	1.00	0.22	-	-	0.20	-	-	-	-	-	-	-
SolDefavorable/SC	38	0.08	-	0.14	0.15	-	-	-	0.19	-	0.22	1.00	-0.21	-	0.15	-	-	-	-	-	-	-
Jour T>5	40	-0.14	0.09	-0.24	-0.14	0.38	-0.20	-0.16	-0.17	-	-	-0.21	1.00	-	-0.23	-	-	-0.19	-	-	-	-
MainDoeuvre/SAU Δ70-80	8'	-0.17	-	-	-0.13	-	-	-0.13	-0.18	0.55	-	-	-	1.00	-	-	-0.10	-	-0.13	0.43	0.10	0.54
Mais/SAU Δ70-80	10'	-	-0.10	-	-	-	-0.10	-	0.28	0.20	-	0.15	-	-	1.00	-	-0.10	-	-	-	0.20	-
Pluie10 Δ70-80	12'	-	-	-	-	-0.32	0.09	-	0.09	-	-	-	-0.23	-	-	1.00	0.11	-	-	-	-	-
SAU/SC Δ70-80	19'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.10	-0.10	-	1.00	-	0.10	-0.19	-0.25	-
SubventionAF/SAU Δ70-80	20'	0.32	-0.11	-	-	-0.66	-	0.27	0.35	-	-	-0.19	-	-	-	0.11	-	1.00	-	-	-0.09	-
TailleParcelle Δ70-80	21'	-	-	-	-	-	-0.50	0.13	0.11	-	-	-	-	-0.13	-	-	0.10	-	1.00	-0.11	-	-
Tracteur/SAU Δ70-80	25'	-	-	-	-0.09	-	0.09	-0.29	0.45	-	-	-	-	0.43	-	-	-0.19	-	-0.11	1.00	0.20	0.38
Vache/(SAU-TO) Δ70-80	28'	-0.13	-	-	-	-	-	-0.12	-0.18	-	-	-	-	0.10	0.20	-	-0.25	-0.09	-	0.20	1.00	-
Voiture/SAU Δ70-80	32'	0.16	-	-	-0.11	-0.11	-	-	-0.11	0.81	-	-	-	-	0.54	-	-	-	-	-	0.38	1.00
1980 et Δ80-90		8	10	12	19	20	21	25	28	32	35	38	40	8'	10'	12'	19'	20'	21'	25'	28'	32'
MainDoeuvre/SAU 80	8	1.00	-0.10	-	-	0.13	-	0.47	-	0.58	-	-	-	-0.58	-	-	-	-0.10	-	-	-	0.59
Mais/SAU 80	10	-0.10	1.00	-0.19	-	-	-0.15	-	0.37	-	0.31	0.15	-	-	-0.41	-	0.09	-0.10	-	-	-0.09	-
Pluie10 80	12	-	-0.19	1.00	-	-	0.19	-	-	-0.15	-	0.14	-0.28	-	-	0.20	-	0.12	-	-	-	-
SAU/SC 80	19	-	-	-	1.00	0.17	0.25	-	0.29	-0.16	0.29	0.15	-0.14	-	-	-	-	-	-0.14	0.10	-	-0.16
SubventionAF/SAU 80	20	0.13	-	-	0.17	1.00	-	0.13	0.23	-0.12	-	-	-0.16	-0.09	-	-	-	-0.74	-0.12	-	-	-0.11
TailleParcelle 80	21	-	-0.15	0.19	0.25	-	1.00	-0.28	-	-	-	-	-0.21	-	-	-	-	0.17	-0.44	-	-	-
Tracteur/SAU 80	25	0.47	-	-	-	-0.13	-0.28	1.00	0.18	0.28	-	-	-0.19	-0.24	-	-0.21	0.09	-0.34	-	-0.39	-0.11	0.23
Vache/(SAU-TO) 80	28	-	0.37	-	0.29	0.23	-	0.18	1.00	-0.10	0.39	0.16	-0.13	-	-0.17	-	0.28	-0.19	-	-0.14	-0.39	-0.13
Voiture/SAU 80	32	0.58	-	-	-0.16	-0.12	-	0.28	-0.10	1.00	-	-	-	-0.58	-	-	-	-	-	-0.19	-	0.91
Pente<17/SC	35	-	0.31	-0.15	0.29	-	-	-	0.39	-	1.00	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SolDefavorable/SC	38	-	0.15	0.14	0.15	-	-	-	0.16	-	0.22	1.00	-0.21	-	-	-0.12	-	-	-	-	-	-
Jour T>5	40	-	-	-0.28	-0.14	0.16	-0.21	-0.19	-0.13	-	-	-0.21	1.00	-	-	0.20	-	-	0.10	-	0.10	-
MainDoeuvre/SAU Δ80-90	8'	-0.58	-	-	-	-0.09	-	-0.24	-	-0.58	-	-	-	1.00	-	-	-0.13	-	-	0.19	-	-0.51
Mais/SAU Δ80-90	10'	-	-0.41	-	-	-	-	-	-0.17	-	-	-	-	-	1.00	-	-0.12	-	-	-	0.16	-
Pluie10 Δ80-90	12'	-	-	0.20	-	-	-	-0.21	-	-	-	-0.12	0.20	-	-	1.00	0.09	-	-	-	-	-
SAU/SC Δ80-90	19'	-	0.09	-	-	-	-	0.09	0.28	-	-	-	-	-0.13	-0.12	-	1.00	-	-	-0.28	-0.27	-
SubventionAF/SAU Δ80-90	20'	-0.10	-0.10	0.12	-	-0.74	0.17	-0.34	-0.19	-	-	-	-	-	-	0.09	-	1.00	0.15	-	-	-
TailleParcelle Δ80-90	21'	-	-	-	-0.14	-0.12	-0.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	1.00	-	-	-
Tracteur/SAU Δ80-90	25'	-	-	-	0.10	-	-	-0.39	-0.14	-0.19	-	-	-	0.19	-	-	-0.28	-	-	1.00	0.18	-
Vache/(SAU-TO) Δ80-90	28'	-	-0.09	-	-	-	-	-0.11	-0.39	-	-	-	0.10	-	0.16	-	-0.27	-	-	0.18	1.00	-
Voiture/SAU Δ80-90	32'	0.59	-	-	-0.16	-0.11	-	0.23	-0.13	0.91	-	-	-	-0.51	-	-	-	-	-	-	-	1.00
1990		8	10	12	19	20	21	25	28	32	35	38	40									
MainDoeuvre/SAU 90	8	1.00	-0.11	-	-	-	-	0.54	0.09	0.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.09
Mais/SAU 90	10	-0.11	1.00	-0.17	-	-0.19	-0.14	-	0.21	-	0.30	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pluie10 90	12	-	-0.17	1.00	-	0.24	0.20	-0.10	-	-	-0.12	-	-0.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SAU/SC 90	19	-	-	-	1.00	0.20	0.17	-	0.18	-0.16	0.28	0.15	-0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SubventionAF/SAU 90	20	-	-0.19	0.24	0.20	1.00	0.21	-0.19	0.11	-0.09	-	-	-0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TailleParcelle 90	21	-	-0.14	0.20	0.17	0.21	1.00	-0.29	-	-	-0.09	-	-0.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.16
Tracteur/SAU 90	25	0.54	-	-0.10	-	-0.19	-0.29	1.00	-	0.18	-	-	-0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vache/(SAU-TO) 90	28	0.09	0.21	-	0.18	0.11	-	-	1.00	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Voiture/SAU 90	32	0.31	-	-	-0.16	-0.09	-	0.18	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pente<17/SC	35	-	0.30	-0.12	0.28	-	-0.09	-	0.29	-	1.00	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SolDefavorable/SC	38	-	0.14	-	0.15	-	-	-	-	-	0.22	1.00	-0.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jour T>5	40	-0.09	-	-0.17	-0.14	0.14	-0.16	-0.20	-	-	-	-0.21	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Annexe 7.3

Nuages de points entre les variables « Main d'œuvre/SAU » et « Tracteur/SAU » à chaque décennies ('50, '60, '70, '80 et '90) (N=936) et sur l'ensemble des 5 décennies ('50à'90) (N=4'680), avec leur droite d'ajustement linéaire.



LUNDSTRÖM Corinne

Ch. de Pierreval 13, 1007 Lausanne

• privé ; prof : 021 / 616 72 75 ; 021 / 693 57 73

Email : corinne.gillieron@epfl.ch

Nationalité suisse

Mariée

Née à Cully, VD

29 ans

**EXPERIENCES PROFESSIONNELLES**

- 1997-2002 **Assistante de recherche** pour Prof. Rodolphe Schlaepfer, Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes (GECOS), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) :
- Projets de recherche en collaboration avec la Station Ornithologique Suisse de Sempach
 - Encadrement d'un travail de diplôme : « *Prévision du danger d'avalanche : contribution d'un modèle mathématique statistique de classification* » par J. Rossier, en collaboration avec l'Institut Fédéral de Recherche sur la Neige et le Paysage (ENA-SLF), Davos
- 1997 **Assistante de recherche** pour Parc Canada, Parc National de Banff, Alberta, Canada : étude de la faune en relation avec l'autoroute (2 mois de travail de terrain)
- 1997 **Collaboratrice** pour Sierra Legal Defence Fund, bureau d'avocats pour l'environnement, Vancouver, Colombie Britannique, Canada: participation à différents projets, responsable de traductions anglais-français (3 mois)
- 1995-1996 **Chef de projets** chez Bischoff, Wagner & Partner SA, bureau d'ingénieurs-conseils pour les emballages et les déchets, Montreux, Suisse : développement d'une méthode d'analyse de cycle de vie des matériaux d'emballages (17 mois)
- 1995 **Responsable de projet** chez Ciba, Monthey, Suisse, département Environnement: mise sur pieds du calcul d'un écobilan de l'usine (mandat de deux mois)
- 1993 **Collaboratrice** chez Impact Concept, bureau d'ingénieurs-conseils, Le Mont-sur-Lausanne, Suisse: exécution d'un projet de réaménagement d'une décharge de matériaux inertes, incluant relevés faune/flore, travaux topométriques (stage de six semaines pendant les études)
- 1991-1997 **Professeur remplaçant**, niveau collège (allemand, anglais, biologie, mathématique, physique, histoire, gymnastique), Ecole suisse de ski

FORMATION

- 1999-2002 **Thèse de doctorat** à l'EPFL, GECOS. Directeur de thèse : Prof. Rodolphe Schlaepfer. En collaboration avec la Station ornithologique suisse de Sempach, Suisse. Intitulée : *“Dynamique du paysage rural de la partie Nord-Ouest de la Suisse, une analyse pour comprendre la variation des populations du lièvre brun (*Lepus europaeus*)”*
- 1990-1995 **Diplôme d'ingénieur en génie rural, avec spécialisation en environnement**, EPFL
- 1987-1990 **Maturité Cantonale**, Gymnase de Chamblandes, Pully, Suisse

COMMUNICATIONS DANS DES CONFERENCES INTERNATIONALES

- 2001 **Gilliéron, C., Schlaepfer, R.** (2001) Modelling of Swiss landscape dynamics at communal level: A tool for understanding the variation of animal species population, with focus on the brown hare (*Lepus europaeus*). In IALE European Conference 2001, Development of European Landscapes. Conference proceedings, Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis 92 (Ed. U. Mander, A. Printsman and H. Palang) Tartu 2001, 114-121.
- 2000 **Gilliéron, C.** (2000) Agricultural landscape dynamics in Switzerland: a model using the brown hare as an indicator of the evolution of ecological qualities. In Multifunctional Landscapes, Interdisciplinary Approaches to Landscape Research and Management. Conference material for the conference on « Multifunctional landscapes », Centre for landscape Research, Roskilde, October 18-21, 2000. Published in September 2000 (Ed. Jesper Brandt, B. Tress, G. Tress), 201.