Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective

Martin Paegelow

▶ **To cite this version:**

Martin Paegelow. Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective. Géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2004. tel-01063119

HAL Id: tel-01063119
https://theses.hal.science/tel-01063119

Submitted on 18 Sep 2014

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

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

UNIVERSITE DE TOULOUSE LE MIRAIL

Département de Géographie et Aménagement

GEODE
GEOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT

Habilitation à Diriger des Recherches

présentée par

Martin Paegelow

Géomatique et géographie de l'environnement

De l'analyse spatiale à la modélisation prospective

Tome I

Soutenue le 14 décembre 2004 à l'Université de Toulouse – Le Mirail devant le jury composé de :

Patrick BERGOUGNOUX	(Rapporteur)	Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse
Claude COLLET		Professeur à l'Université de Fribourg (Suisse)
Pierre DUMOLARD	(Rapporteur)	Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble
Jacques HUBSCHMAN	(Rapporteur)	Professeur à l'Université de Toulouse – Le Mirail
Robert MARCONIS		Professeur à l'Université de Toulouse – Le Mirail
Stanislas WICHEREK		Directeur de Recherche au Centre de Biogéographie-Ecologie FRE 2545 CNRS

UNIVERSITE DE TOULOUSE LE MIRAIL

Département de Géographie et Aménagement

GEODE
GEOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT

Habilitation à Diriger des Recherches

présentée par

Martin Paegelow

Géomatique et géographie de l'environnement

De l'analyse spatiale à la modélisation prospective

Tome I

Soutenue le 14 décembre 2004 à l'Université de Toulouse – Le Mirail devant le jury composé de :

Patrick BERGOUGNOUX	(Rapporteur)	Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse
Claude COLLET		Professeur à l'Université de Fribourg (Suisse)
Pierre DUMOLARD	(Rapporteur)	Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble
Jacques HUBSCHMAN	(Rapporteur)	Professeur à l'Université de Toulouse – Le Mirail
Robert MARCONIS		Professeur à l'Université de Toulouse – Le Mirail
Stanislas WICHEREK		Directeur de Recherche au Centre de Biogéographie-Ecologie FRE 2545 CNRS

à Raphaël, Camille et Mathilde

à Isabelle

Les travaux synthétisés dans ce document n'auraient jamais existé sans le concours de nombreuses personnes. C'est donc avec un grand plaisir que je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à tous ceux qui, d'une façon ou d'une autre, ont contribué aux résultats présentés dans ce mémoire.

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur Jacques HUBSCHMAN, Professeur à l'Université de Toulouse – Le Mirail, qui assure la direction de mes recherches au sein du laboratoire GEODE UMR 5602 CNRS. La rigueur de son jugement, la pertinence de ses conseils, son recul scientifique et la confiance qu'il m'a témoignée en toute circonstance sont autant d'éléments sans lesquels je n'aurais jamais pu déployer mes activités de recherche et d'enseignement dans d'aussi bonnes conditions.

Je remercie également tous les autres membres du jury qui ont accepté de s'intéresser à mes travaux et m'ont apporté leur jugement d'experts :

Monsieur Patrick BERGOUGNOUX, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, qui a accepté d'être rapporteur de cette Habilitation et qui, depuis plusieurs années, montre un grand intérêt pour mon travail. Sa conception interdisciplinaire de la géomatique et l'orientation résolument scientifique qu'il lui impulse sont une référence pour ma recherche et je suis très reconnaissant de sa participation à ce jury.

Monsieur Claude COLLET, Professeur à l'Université de Fribourg (Suisse), qui a accepté de participer à ce jury ; sa compétence géomatique, son approche critique à l'égard des SIG et l'envergure internationale de ses recherches font que je suis particulièrement honoré de l'intérêt et du temps qu'il a bien voulu consacrer à l'étude de mes travaux.

Monsieur Pierre DUMOLARD, Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, qui a également accepté d'être rapporteur ; la notoriété de ses recherches en géomatique et en gestion des risques naturels et l'intérêt qu'il témoigne à l'égard à mon travail, font que je suis particulièrement honoré de sa présence dans ce jury d'Habilitation.

Monsieur Robert MARCONIS, Professeur à l'Université de Toulouse – Le Mirail et Directeur du Département de Géographie et Aménagement, qui a étudié avec attention mes travaux et qui a accepté d'être membre du jury. Son dynamisme, son esprit d'ouverture et la notoriété internationale de ses recherches géographiques sont pour moi un exemple.

Monsieur Stanislas WICHEREK, Directeur de Recherche au Centre Biogéographie-Ecologie FRE 2545 CNRS, qui me fait l'honneur de s'intéresser à mon travail. L'impulsion qu'il a su donner aux recherches environnementales, écologiques et paysagères et sa pertinence scientifique font que je suis très flatté de sa participation à ce jury.

Je tiens également à associer à ces remerciements mes collègues du GEODE et de l'Université de Toulouse – Le Mirail avec lesquels je partage ma passion pour la

recherche et pour l'enseignement. Je suis particulièrement reconnaissant envers les étudiants et stagiaires qui ont contribué à ces recherches. Je remercie également mes collègues du Groupement de Recherche en Informatique et Mathématiques du Mirail (GRIMM, EA 3686) et de l'Instituto de Desarrollo Regional de l'Université de Grenade (Espagne), en particulier Mayte Camacho Olmedo, pour leur collaboration fructueuse et déterminante.

Un vif remerciement également à Jean-Paul Métailié, à la fois pour les excellentes conditions de travail qu'il a su créer en tant que Directeur du GEODE UMR 5602 CNRS et pour la qualité des dessins qu'il a bien voulu réaliser afin d'illustrer ce mémoire.

Ma reconnaissance va aussi vers ma famille et mes amis qui ont su me supporter en toute circonstance.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma mère. Elle s'adresse aussi à la mémoire de mon père. A l'aube de cette nouvelle étape de mon cursus universitaire, j'espère seulement être à la hauteur des sacrifices qu'ils n'ont cessé de consentir.

Sommaire

Géomatique et géographie de l'environnement
De l'analyse spatiale à la modélisation prospective

Tome I

Introduction **9**

I. Une perspective géomatique : de l'analyse spatiale aux recherches environnementales **13**

Chapitre 1. Emergence d'un nouveau champ transversal : la géomatique **15**
1.1. Aux racines méthodologiques de la géomatique 22
1.2. De la phase pionnière à l'ordinaire géomatique 27

Chapitre 2. La géomatique et sa géographie **39**
2.1. Géomatique XOR géographie ou géomatique AND géographie ? 39
2.2. Des fonctionnalités géomatiques en géographie 43

Chapitre 3. Parcours géomatique d'un géographe de l'environnement **56**
3.1. Apprentissages et questionnements 56
3.2. Autour d'Auradé : l'entrée en géomatique environnementale 58
3.3. De SICA à Cartima, une parenthèse en entreprise 68
3.4. D'un environnement à l'autre 71
3.5. Vers une pédagogie active de la géomatique en géographie 95

II. Modélisation, géomatique et simulation prospective de dynamiques environnementales **98**

Chapitre 1. Aperçu des approches en modélisation et simulation prospective applicables en géographie de l'environnement **100**
1.1. Quelques concepts de base et typologies de modèles 100
1.2. Gestion du temps dans les SIG 110
1.3. Modèles déterministes 114
1.4. Modèles et simulations stochastiques 117
1.5. Des automates cellulaires aux réseaux de neurones : modèles faisant appel à l'intelligence artificielle 121
1.6. Modèles à logique floue 132

Chapitre 2. Un modèle géomatique combiné de simulation prospective de l'occupation du sol **136**
2.1. Description du modèle 136
2.2. Mise en œuvre du modèle 141
2.3. Validation du modèle et interprétation des résultats 147

Chapitre 3. Le modèle du géographe face à celui du mathématicien 153
3.1. Description des modèles alternatifs : modèle paramétrique non linéaire et réseaux neuronaux 154
3.2. Mise en œuvre des modèles 157
3.3. Validations et interprétation des résultats 159

Chapitre 4. Le croisement des regards 162

III. Perspectives 170

Chapitre 1. Perspectives en matière de modélisation et de simulation prospective 172
1.1. Mise en œuvre et validation sur d'autres terrains 172
1.2. Affiner la variable étudiée 173
1.3. Améliorer l'explication spatio-temporelle de l'occupation du sol à travers les variables d'environnement dans le cadre de l'évaluation multicritère 174
1.4. Ouvrir le modèle à l'incertitude 174
1.5. Elargir le réseau de partenariat scientifique 174
1.6. Coupler le modèle géomatique combiné aux modèles mathématiques 175
1.7. Construire des scénarios prospectifs 175
1.8. Evaluer les possibilités de transfert et de généralisation du modèle 177

Chapitre 2. Nouvelles ouvertures thématiques 178
2.1. Création, recréation et permanence des vignobles de qualité 178
2.2. Dynamique du paysage agraire à Cuba 179
2.3. Gestion de risques naturels 180
2.4. Gestion patrimoniale de l'environnement sahélien, lutte contre la désertification et conservation de la biodiversité 180

Chapitre 3. De la valorisation de la recherche à la formation sous contrainte LMD 181
3.1. Valoriser la recherche autour d' « observatoires de l'environnement » 181
3.2. De la recherche à l'action 182
3.3. La recherche par la formation : structuration d'un champ d'enseignement en géomatique 183

En guise de conclusion 185

Bibliographie 187

Table des figures 207

Table des tableaux 211

Tome II : Curriculum vitae, activité professionnelle et publications

Les sciences, séparées des lettres, demeurent machinales et brutes, et les lettres, privées des sciences, sont creuses, car la science est la substance des lettres.

Anatole France (1844-1924)

Introduction

Il y a bientôt quarante ans, Roger Tomlinson s'attelait à la conception du premier SIG, dédié à la gestion de la forêt canadienne, le CGIS[1]. Dans sa phase d'émergence, la géomatique foisonnait d'initiatives, plus ou moins coordonnées, dont certaines se sont avérées être des impasses. Cependant, nombreuses sont celles qui ont rapidement démontré l'utilité et l'extraordinaire diversité du traitement numérique de l'information géographique – envisagé d'abord comme simple outil technique puis, au-delà de cet aspect utilitaire, en se nourrissant des avancées de la recherche géomatique transdisciplinaire, également comme concept et approche méthodologique pour appréhender l'espace, le temps et leurs propriétés géographiques – dans des secteurs d'activité et de disciplines scientifiques très variés et, notamment, en géographie.

SIG, géomatique : ouvrons ici une brève parenthèse sur ces deux vocables qui, dans ce mémoire, sont parfois utilisés l'un pour l'autre, par simple commodité. En fait, alors que le SIG est, à tort ou à raison, souvent assimilé plutôt à un outil, le terme géomatique, apparu il y a seulement une quinzaine d'années, désigne par contre une réalité plus large, plus générique. La géomatique, qui englobe les SIG aux côtés d'autres traitements, a acquis ainsi le statut d'un véritable ensemble disciplinaire cohérent, doté, au-delà des aspects techniques, d'une épaisseur scientifique qui n'est pas toujours reconnue au SIG.

Le recours aux SIG ou, de façon plus générale, à la géomatique est devenu commun en géographie de l'environnement. Ainsi, les méthodes et techniques d'acquisition, de traitement et de restitution de données géoréférencées sont-elles devenues indissociables, de nos jours, de la prévention et de la lutte contre les risques naturels et de la gestion environnementale de l'espace : études d'impact, recherches en histoire de l'environnement, gestion de territoires à statut environnemental reconnu. Cet *ordinaire de la géomatique* repose sur des fonctionnalités, largement implémentées depuis une dizaine d'années, dans les logiciels disponibles sur le marché : algèbre booléenne et relationnelle et analyses contextuelles, pour l'essentiel. Si le traitement numérique de l'information géographique offre, aujourd'hui, une gamme très fournie d'outils pour l'analyse spatiale, cartographique, statistique et géostatistique, le facteur temps y est, trop souvent encore, approché comme simple attribut parmi d'autres. L'analyse spatio-temporelle, au cœur de notre discipline, s'en retrouve

[1] CGIS – Canadian Geographic Information System

quelque peu réduite, dans de nombreux projets de recherche, au simple croisement de plans d'information temporels. Sans doute de telles analyses permettent-elles de retracer l'évolution passée d'un phénomène, en s'appuyant sur quelques fenêtres temporelles documentées, et de l'expliquer, au moins partiellement, en la reliant à nombre de critères environnementaux. L'analyse prospective, en revanche, se heurte à certaines limites méthodologiques bien identifiées : la non-linéarité de la plupart des dynamiques, le caractère *tranchant* de l'algèbre logique classique ou encore le degré trop déterministe, au sens statistique du terme, des modèles mis en œuvre.

Pourtant, gérer l'environnement implique nécessairement d'anticiper, de pouvoir se projeter dans l'avenir. Devant la complexité des anthroposystèmes et de leur trajectoire dans le temps, la géomatique permet d'ouvrir un champ de recherche prometteur en matière de modélisation (description formalisée du comportement systémique) et de simulation (son immersion dans le temps), bien au-delà du simple arsenal d'outils techniques auquel on est parfois tenté de la réduire. La conception actuelle de telles problématiques reconnaît le statut exploratoire et la valeur de scénario raisonné des extrapolations du comportement systémique, en quantifiant la validation des résultats tout en l'insérant dans une fourchette de probabilités. A défaut de pouvoir prédire ce qui est parfois imprédictible, la modélisation systémique et la simulation prospective de dynamiques environnementales forment, avant tout, une démarche scientifique intéressante, dans la compréhension de processus environnementaux très complexes, qui conduit à la fois à approfondir leur connaissance et à soulever de nouvelles questions.

Cependant, le débat sur l'utilité de la géomatique en matière de modélisation et de simulation mais aussi sur son statut épistémologique en géographie, est loin d'être clos. Format numérique et disponibilité des données ne favorisent-ils pas une démarche trop souvent exclusivement inductive ? Ne déroutent-ils pas l'effort de la recherche vers des questions subordonnées ? Ne sont-ils pas un vecteur induisant un retour vers l'*espace absolu* (Macmillan, 1997) ? Et le choix de l'outil et du mode conceptuel de représentation numérique de phénomènes réels, peut-il être neutre et sans conséquences sur le processus d'élaboration de la connaissance ?

Béquille intellectuelle ou modèle validé, la simulation prospective spatialisée admet de nos jours une connaissance lacunaire et un degré de confiance nuancé dans les données utilisées, afin d'épouser plus étroitement les conditions réelles. Pour cela, la géomatique emprunte et développe des concepts de recherche tels que l'aide à la décision, la logique floue, les calculs stochastiques ou encore l'intelligence artificielle distribuée, pour simuler les transitions

temporelles discrètes des états de la variable étudiée, tout en procédant à leur allocation spatiale. Le couplage des différentes approches constitue une voie de recherche fréquemment empruntée actuellement. Est-ce simplement un constat d'échec des voies empruntées jusqu'alors ou peut-on y voir le signe d'une certaine maturation, car une telle démarche, intégrée, reconnaît les limites inhérentes à chaque modèle et témoigne du recul scientifique nécessaire ?
Quel que soit l'outillage conceptuel, la modélisation et la simulation, qui reposent sur une abstraction et une simplification du réel, doivent éviter de se perdre dans une complexification trop poussée, qui risquerait de porter préjudice à la généralisation des résultats et qui aboutirait à des effets de seuils de connaissance en retour, tout en augmentant, parfois de manière exponentielle, le coût de maîtrise du modèle.

Cette évolution de la géomatique vers la modélisation prospective, telle que nous venons de l'évoquer, correspond également à notre trajectoire géomatique personnelle de géographe de l'environnement : de l'apprentissage à son application au service de recherches environnementales, des interrogations premières à des recherches dotées d'un accent méthodologique géomatique plus prononcé, autour de la simulation prospective de l'occupation du sol. Sans pour autant délaisser les recherches thématiques, cette dernière orientation découle logiquement de nos travaux antérieurs, portant en partie sur la dynamique spatio-temporelle environnementale, même si elle témoigne également, de notre part, d'un attrait incontestable pour les aspects théoriques et cognitifs de la modélisation.

Le présent mémoire (tome I) retrace notre parcours géomatique de géographe de l'environnement, en le situant d'abord dans le champ scientifique avant de résumer les principales approches en modélisation et en simulation prospective applicables dans ce domaine. Sur ces bases, nous présentons le modèle géomatique de simulation prospective de l'occupation du sol que nous avons établi, avant de conclure en ouvrant sur des perspectives de recherches.

Dans la première partie, le positionnement scientifique de la géomatique fait l'objet des deux premiers chapitres qui analysent l'émergence de ce nouveau champ transdisciplinaire et ses relations avec la géographie. Notre itinéraire d'enseignant-chercheur, une trajectoire à

l'interface géomatique et géographie de l'environnement, semée d'interrogations, d'avancées, de productions et de nouveaux questionnements, est résumé dans le chapitre trois.

La seconde partie est consacrée à la modélisation et à la simulation prospective de dynamiques environnementales – des recherches entreprises, pour l'essentiel, dans le cadre de la géomatique mais ayant, pour la plupart d'entre elles, des racines théoriques plus anciennes. Le premier chapitre, l'état de l'art, présente les principales approches en modélisation et en simulation applicables à la géographie de l'environnement. Sur ces bases, nous présentons (chapitre deux) un modèle géomatique, combinant plusieurs méthodes modélisatrices, de simulation prospective de l'occupation du sol. Ce modèle, mis en œuvre et validé, est confronté, dans un troisième chapitre, à deux modèles mathématiques, également appliqués et validés dans le cadre de nos projets de recherche. Les performances respectives de chacun des modèles sont discutées dans le quatrième chapitre.

Dans une dernière partie, beaucoup plus brève, nous concluons ce mémoire en esquissant quelques perspectives. Perspectives de développement des recherches en matière de modélisation d'abord, mais également de thématiques environnementales que nous souhaitons approfondir (premier et second chapitre). Dans un troisième et bref chapitre, enfin, sont suggérées quelques pistes sur la valorisation de nos recherches et les nouveaux enjeux de la formation géomatique en géographie.

Ce mémoire est complété par un second fascicule, incluant curriculum vitae et faisant état de nos activités professionnelles et publications.

I. Une perspective géomatique : de l'analyse spatiale aux recherches environnementales

Dans cette première partie, nous nous proposons de retracer l'essor de la géomatique en privilégiant les concepts et méthodes dont certains sont parfois bien antérieurs à l'ère informatique. Cette introduction nous semble essentielle à la fois pour cerner ce que nombre d'auteurs qualifient de champ scientifique transdisciplinaire et pour souligner son degré d'ancrage dans notre discipline qui, comme dans un échange mutuel, s'en trouve stimulée et enrichie. Le second chapitre – la géographie et sa géomatique – illustre son insertion et ses apports à la géographie ou, selon le point de vue adopté, son développement en quasi-discipline autonome au sein (ou à côté ou au-delà ?) de la géographie. Sans vouloir trancher ce débat, nous constatons simplement l'ampleur du champ commun : l'espace géographique et les traitements de l'information spatialisée, souvent facilités, parfois rendus possibles par la géomatique. Le troisième chapitre replace ces idées dans une perspective personnelle, celle d'un géographe et de son parcours géomatique pour une géographie de l'environnement.

Chapitre 1. Emergence d'un nouveau champ transversal : la géomatique

SIG ou géomatique – quelques définitions

SIG

Le système d'information géographique (SIG) est un cas particulier des systèmes d'information (SI). Au sens large du terme un système d'information est une collection de données et d'outils qui manipulent ces données. Selon la norme ISO 5127-1-1983, un SI est « un système de communication permettant de communiquer et de traiter l'information » (Denègre et Salgé, 1996). Les données peuvent être de nature numérique, textuelle ou audiovisuelle. Ces données sont matérialisées de manière digitale même si, sur le plan conceptuel, elles pourraient être analogiques (certaines auteurs estiment qu'un SI pourraient être non informatisé). Toutes ces données sont des représentations de phénomènes du monde réel. Or notre perception du monde implique des processus cognitifs comme la sélection, la généralisation ou la synthèse. Etant donné que la perception est un processus individuel, chacun a *sa* vision du monde et nous représentons et communiquons à travers nos impressions, notre vision du monde réel. La mise en commun de nos perceptions subjectives aboutit à ce qu'on peut appeler un modèle conceptuel basé sur des définitions et des conventions. Les SI en général et les SIG en particulier se situent entre le modèle conceptuel intersubjectif et la représentation binaire dans l'ordinateur. De ce point de vue, ils constituent une interface homme – machine (IHM).
La représentation physique de cette perception - les données - est un modèle des phénomènes perçus (Laurini et Thompson, 1992). Ces données peuvent être subjectives (impressions de voyage) ou normées (recensement de la population). Une collection de données - une base de données - est donc un dépôt matérialisé de notre connaissance à un moment donné pourvu d'outils de traitement des données. Suivant cette approche, il convient de distinguer entre les termes *donnée* et *information*. Cette dernière n'est pas directement apparente. Elle se construit à partir de plusieurs données enregistrées et de nos facultés intuitives et de pensée qui dépendent, entre autres, de notre connaissance. Ainsi usons nous de notre connaissance pour donner un sens à une donnée latitudinale. 65°N n'est qu'une donnée. D'autres données et leur interconnexion (pensée) sont nécessaires pour en produire une information : climat polaire et ses conséquences sur le déploiement des activités humaines.

La particularité des SIG tient à la nature des données traitées. Ces dernières sont géoréférencées, c'est-à-dire que leur position est connue dans un référentiel spatial et que le SI dispose d'outils spécifiques au caractère spatial des données : la panoplie de l'analyse spatiale.

Comment définir un système d'information géographique? La plupart des auteurs privilégient un des critères suivants : les composantes d'un SIG, ses fonctionnalités ou sa finalité (objectifs). Devant la multiplicité des définitions ayant cours dans des disciplines scientifiques et des secteurs d'activité différents, certains auteurs préfèrent commencer par décrire un système d'information géographique avant de retenir une ou plusieurs définitions lexicales. Ainsi Comas et Ruiz (1993) traitent d'abord des SIG et de leurs applications, ensuite de leur histoire avant de tenter une définition … qui commence avec l'énumération des composantes

d'un SIG. Selon ces deux auteurs, la difficulté d'aboutir à une définition largement acceptée est liée à trois facteurs: la diversité des applications, l'orientation commerciale et l'évolution technique très rapide du secteur informatique.
L'essor et la popularité accrue des SIG à partir du milieu des années 1980 ont été ressentis par plusieurs professions et disciplines scientifiques. La ramification et la diversification propres à une technologie et une méthodologie naissantes sont également valables pour le secteur des SIG. Ainsi ce nouveau champ scientifique transversal fut investi par de nombreuses disciplines: géographes, cartographes, géomètres, topographes, aménageurs, militaires, ..., chacune élaborant son approche et par l'intermédiaire de ses applications plus ou moins particulières donnant son empreinte aux SIG.
Parallèlement, les SIG sont devenus rapidement un enjeu économique. Dangermond (1991) esquissa déjà au tout début des années 1990 des taux de croissance spectaculaires pour le secteur des SIG. Enfin, l'évolution rapide du secteur informatique en général s'est répercutée sur les SIG en leur permettant une percée spectaculaire au niveau des applications et d'intégration comme outil de recherche et d'aide à la décision dans de nombreuses institutions.
Ce développement rapide a engendré une certaine confusion terminologique, un effet accompagnateur banal pour un champ scientifique transversal en cours d'émergence. Il en ressort qu'aujourd'hui le SIG est défini, grosso modo, soit comme logiciel, soit comme système d'information ou encore comme sous-ensemble de la géomatique.
La première conception, la plus réductrice, envisage le SIG simplement comme un programme informatique tel que ARC/INFO (pour ne citer que le premier logiciel commercialisé du domaine) – une définition purement technique coupant le SIG de ses sources scientifiques. La seconde approche se distingue de la première en mettant l'accent sur le fait qu'un SIG forme un tout: logiciel, matériel, données et intelligence humaine. Un tel système d'information se cristallise sous forme de projets tel que DIME[2]. La troisième acceptation du terme entend par SIG un secteur scientifique et professionnel transdisciplinaire - un point de vue correspondant au terme de géomatique introduit par Laurini et Thompson (1992). Mais avant de développer le terme de géomatique, nous tenterons une synthèse des définitions SIG parues.
Peter Burrough (1986) définit le SIG de la manière suivante : « Un SIG est un équipement instrumental puissant pour l'acquisition, la représentation, le traitement, la transformation et la représentation de données localisées relatives au monde réel ». Cette définition de l'auteur du premier manuel SIG, souvent citée, met l'accent sur les fonctionnalités de traitement des données et caractérise le SIG d'abord comme outil. Il en va de même pour le DoE (Department of Environment, Grande Bretagne 1987): « Système pour acquérir, organiser, vérifier, intégrer, traiter, analyser et représenter des données géoréférencées sur la terre ».
Roger Tomlinson (1987) décrit le SIG comme un « système digital pour l'analyse et le traitement de tout type de données géographiques afin d'apporter de l'information utile à l'aménagement du territoire ». Cette définition – tout en insistant sur les aspects fonctionnels – ajoute une finalité thématique à l'outil. Ce caractère appliqué est encore plus souligné par David Cowen (1988) qui définit le SIG comme un « système d'aide à la décision qui place des données géoréférencées dans un contexte de résolution de problèmes ».
En ce qui concerne le concept de représentation des données (image/objet) et les fonctionnalités qui y sont liées, M.F. Goodchild (1988) prend ouvertement position pour la version vectorielle des SIG : « un système qui utilise une base de données localisées pour générer des réponses à des questions d'ordre géographique. Un SIG peut être décrit comme un

[2] DIME = Dual Independant Map Encoding – procédure mise au point aux Etats-Unis au début des années 1970 pour une analyse spatiale fine des recensements de population ; première approche informatisée de la cartographie schématique de l'espace.

ensemble de routines spatiales spécialisées qui s'appuient sur une base de données relationnelle standardisée ».
Clarke (1990) définit un SIG comme un « système assisté par ordinateur pour l'acquisition, l'archivage, la réorganisation, l'analyse et l'affichage de données spatiales ». Dans ce sens, très large, pratiquement tout logiciel capable d'afficher une carte à l'écran et d'effectuer une requête est un SIG. Nombre d'auteurs exigent d'un SIG la possibilité de pouvoir *croiser*[3] différents plans d'information, afin de distinguer des SIG des logiciels de cartographie automatique axés sur l'affichage des données et non sur leur traitement.
Le NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis, 1990) en décrivant le SIG comme un « système composé de hardware, de software et de procédures pour acquérir, manipuler, traiter, analyser, modéliser et représenter des données géoréférencées dans le but de résoudre des problèmes de gestion et d'aménagement » propose une définition insistant à la fois sur les composantes, les fonctionnalités et la finalité des systèmes d'information géographique. En fait cette définition, très connue et couramment citée, repose sur celle de la FICCDC (USA : Comité fédéral de coordination inter-agences pour la cartographie numérique), publiée deux ans plus tôt (IGN, 1994) : « système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion ».
Michel Didier (1990) insiste également sur l'aspect utilitaire en définissant le SIG comme « ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision ».
En 1993, Hewlett Packard reprend le terme modélisation parmi les fonctionnalités requises d'un SIG : « un système informatique composée de hardware, software, données et applications qui est utilisé pour enregistrer numériquement, éditer, modéliser et analyser des données géoréférencées et de les représenter de façon graphique et alphanumérique ». Le terme de modélisation fait explicitement référence à l'anticipation, la prévision, la simulation. En ce sens – et en insistant sur l'utilité du SIG pour la gestion et l'aménagement – cette définition va au-delà des exigences formulées par Cowen cinq ans plus tôt.
Françoise de Blomac (1994) fait explicitement référence au personnel qualifié en décrivant le SIG comme « un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées ».
A travers ces quelques exemples, présentés dans l'ordre chronologique, on note également une certaine progression dans ce qui est attendu des SIG.
Depuis le milieu des années 1990, le contenu et l'orientation des définitions proposées ne varient guère comme en témoignent les quelques définitions récentes affichées sur divers sites Internet. Le réseau national des conseils régionaux de l'environnement du Québec (RNCREQ, 2003) parle ainsi d'un « ensemble organisé de matériel, de logiciels et de données géographiques visant à saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et afficher toutes les formes d'information à référence géographique ». La Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (in : Microplan, 2004) propose une synthèse : « un système informatique qui permet à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace. ». ESRI France propose une définition courte mais assez floue : « Un Système d'Information Géographique est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les choses qui existent sur terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent » (sigfrance, 2003).

[3] Il s'agit, en fait, de leur mise en relation par l'intermédiaire d'opérateurs logiques

Au vu de cet échantillon de définitions et de leur évolution sur une décennie, on peut qualifier le SIG comme un ensemble de matériel (hardware) et de logiciel (software), de plus en plus imbriqué dans des réseaux (netware), de données et de personnel qualifié capable d'acquérir, de stocker, de traiter, d'analyser, de modéliser, de représenter des données géoréférencées numériques, et utile dans de nombreux domaines d'application manipulant l'information spatialisée où cet outil apporte une aide à la prise de décision.

SIG et autres SI

Hy Dao (2002) évoque dans ses notes de cours « une foule de termes » à propos de la définition du système d'information géographique. Parmi les spécialisations fonctionnelles, branches thématiques et considérations d'ordre conceptuel – en ne citant que les plus connues – on peut dresser la liste des termes suivants :

- Système d'information spatial (SIS) – un terme introduit par certains auteurs (Laurini et Tompson, 1992) afin de distinguer entre géoréférencement utilisant un référentiel absolu (projection cartographique, latitude/longitude), procédure de localisation propre aux SIG, et les autres SIS dont les données sont localisées dans un référentiel relatif permettant la localisation à l'intérieur du référentiel mais n'autorisant pas la détermination de sa position par rapport au géoïde terrestre. L'exemple, certainement le plus connu, d'un référentiel relatif est le plan de ville (coordonnées x et y dont l'origine est arbitraire).
- Système d'information à référence spatiale (SIRS) – selon Hy Dao (op. cit.), se basant sur Collet (1992) et Pornon (1990), un terme synonyme notamment utilisé au Canada.
- Système d'information du territoire (SIT) – un terme faisant référence à une spécialisation : l'aménagement du territoire et la gestion du cadastre. Le terme SIT est la traduction du concept anglophone du « land information system (LIS) » qui a fait son apparition lors des grands programmes de numérisation des planches cadastrales et des informations annexes. Selon la Fédération Internationale des Géomètres (FIG), un LIS est un outil légal, administratif et économique afin de faciliter la prise de décision dans les secteurs de l'aménagement et du développement. Un LIS[4] se compose, d'une part, d'une base de données contenant des données territoriales référencées et, d'autre part, de procédures et de techniques afin de saisir, d'actualiser, de traiter et de diffuser systématiquement ces données (Dale, 1991, in: Comas et Ruiz, 1993). Si le SIG a pour objectif premier d'analyser l'information spatiale, le LIS est conçu d'abord pour la gestion des données cadastrales.
- Automated Mapping and Facilities Management (AM/FM) – un terme anglophone usuel pour désigner les SIG spécialisés dans la gestion des réseaux d'infrastructures (routes, eau potable, eaux usées, gaz, électricité, lignes de communication, …).

[4] D'autres termes désignent dans le monde anglophone des SIG spécialisés : land and ressource information system (LRIS), urban information system (URIS), environmental information system (ERIS), cadastral information system (CAIS) pour ne citer que Taylor (1994).

- Système d'information de l'environnement (SIE) (Dao, op. cit.) – à l'instar des SIT il s'agit d'un exemple d'un SIG dont les fonctionnalités sont adaptées à un type d'applications particulier.

Géomatique

Au sens lexical, la géomatique signifie l' « application de l'informatique à la géographie (par exemple sous la forme de SIG) » (dictionnaire en ligne tout-savoir, 2003) ou encore, plus explicitement selon un autre dictionnaire online (dir.ansme.com, 2004) : « *La géomatique est un champ d'activités qui intègre, selon une approche systémique, l'ensemble des moyens d'acquisition et de gestion des données à référence spatiale requis pour effectuer les opérations scientifiques, administratives, légales et techniques dans le cadre du processus de production et de gestion de l'information sur le territoire* (définition parue dans GEOMATICA, vol 53, No. 1, 1999). D'une manière générale et générique on peut dire que la géomatique se résume à l'acquisition, la production, la gestion et la diffusion d'informations géoréférencées. Elle couvre un ensemble de techniques telles que les levés cadastraux, la géodésie, la cartographie topographique et thématique, l'hydrographie, la télédétection, le traitement d'images et les systèmes d'information géographique (SIG). »
Le Journal Officiel parle simplement de « l'ensemble des techniques de traitement informatique des données géographiques » (Journal Officiel du 14 février 1994).
Hy Dao (2002) évoque, en comparant SIG et géomatique, une vision plus large : « d'un point de vue élargi, les SIG englobent également les techniques de collecte de données comme les levés cadastraux (géomètres), la télédétection aérienne ou satellitaire, les mesures de terrain, etc. ; on parle alors plutôt de géomatique. Il est important de relever que les SIG sont à la croisée de nombreuses technologies : informatique, base de données, cartographie, réseaux informatiques, etc. ».

A l'instar des définitions du SIG, celles de la géomatique connaissent un éventail assez large. Ainsi certaines mettent l'accent sur un ancrage disciplinaire. Citons par exemple la définition du Ministère des ressources naturelles du Canada (in : site Web de l'Université d'Avignon, 2004) qui attribue la géomatique aux sciences de la terre et à l'informatique[5] : « Discipline des Sciences de la Terre et des Technologies de l'Information qui a pour objet la gestion des données à référence spatiale et fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion ».

L'origine du mot est attribuée au géomètre et photogrammètre français Bernard Dubuisson qui a introduit le terme à la fin des années 1960 « afin de refléter ce que devenait la réalité de cette profession à cette époque » (Université de Laval, 2003). Mais, insistent les auteurs du site du Génie Civil et Habitat de l'Académie de Paris (2003), « c'est principalement au Québec au sein de l'université Laval que la géomatique s'est développée au début des années 1980, où elle devient une discipline à part entière ».

L'encyclopédie électronique Hypergéo (2004) retrace notamment l'essor canadien du terme : « C´est au Canada que le mot fait son apparition. Ainsi, en 1993, l´Office de la langue française du Québec adopte le terme *géomatique* comme *« la discipline ayant pour objet la*

[5] Le site Web avertit le lecteur en annonçant qu'il ne s'agit que d'une définition parmi de nombreuses autres.

gestion des données à référence spatiale et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion ». Dans ce pays, la géomatique apparaît comme une des quatre composantes du secteur des sciences de la terre au Ministère des Ressources Naturelles du Canada. L´université Laval à Québec contient une « Faculté de Foresterie et *Géomatique* » où se trouve le « Département des Sciences *Géomatiques »* qui héberge lui-même le « Centre de Recherche en *Géomatique* ». ».
Selon la même source, la percée du terme et la généralisation du concept de la géomatique ont été retardées par l'existence du terme sciences géographiques. Ce terme est fortement associé à l'IGN et son Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) ce qui explique que « la géomatique n´est pas une discipline universitaire « officielle » comme dans d´autres pays. Néanmoins, cette situation évolue un peu. Quelques universités s´intéressent à ce domaine, des formations apparaissent et quelques programmes de recherche sont menés depuis plusieurs années. »

Laurini et Thompson (1992) et Laurini et Milleret-Raffort (1993) fournissent une explication davantage systémique de la géomatique en insistant sur les synergies se créant dans ce champ transdisciplinaire. Selon eux la géomatique se nourrit, sur le plan intellectuel, de plusieurs disciplines et est au croisement de plusieurs champs d'application. Ceci repose sur le fait que la composante spatiale joue un rôle de plus en plus important dans beaucoup de disciplines allant de l'aménagement du territoire jusqu'à l'optimisation des points de vente de … pizzas. Ainsi les auteurs distinguent des disciplines ayant développé des concepts impliquant l'espace (géographie, géologie, architecture, …), des domaines ayant développé des outils pour manipuler des données spatiales (cartographie, géodésie, photogrammétrie, télédétection, …), des disciplines fournissant des fondements théoriques ou des formalisations pour appréhender l'espace (géométrie, informatique, (géo)statistiques, sémiologie, …), des disciplines ayant conceptualisé des règles pour l'emploi de l'information (droit, économie, …) et finalement les utilisateurs de la géomatique.

La caractéristique transversale et transdisciplinaire est également mise en avant comme trait intrinsèque de la géomatique par les auteurs d'Hypergeo (2004) : « Si l´on retient, la définition québécoise, la géomatique est avant tout une activité à caractère opérationnel qui s´applique à de nombreux domaines : Les secteurs administratifs : agriculture et forêt, armée, équipement, environnement, etc. Les collectivités territoriales : gestion des réseaux techniques, aménagement et urbanisme, cadastre, gestion des déchets et des ressources naturelles, risque et environnement, transports, services d´urgence et de secours. Dans les secteurs commerciaux : géomarketing, immobilier, banques, assurances, etc. Mais la géomatique est aussi une activité de recherche et développement. Pour décrire le contenu scientifique actuel recouvert par ce terme, il apparaît plus pertinent de le voir comme un réseau de connexions entre différents domaines scientifiques et technologiques plutôt qu´un domaine d´étude bien circonscrit. Il est important aussi de mettre en évidence les outils spécifiques à la géomatique, car leur développement est à la source de nombreuses recherches où interfèrent différents domaines disciplinaires. »

Comme pour le SIG, l'origine du terme est nord-américaine. Si, en l'occurrence, elle est québécoise, il est paradoxal de constater que ce terme – désormais mondialement utilisé – l'est davantage dans les pays anglophones que dans les pays francophones (mis à part son berceau québécois). Un phénomène que le Génie Civil et Habitat (2003) attribue à une prise de conscience plus aigue dans le monde anglophone de la nécessité de développer une vision plus globale que sectorielle de l'ensemble des activités géomatiques. D'autre part, force est de

constater que l'aspect synergique et conceptuel de la définition (voir notamment Laurini et Thompson, 1992) semble s'effacer derrière l'utilitarisme technique.

SIG et géographie

Après ce bref tour d'horizon, il apparaît que le SIG – tout comme la géomatique – revêt incontestablement un caractère interdisciplinaire. Pour les géographes, il ne s'agit cependant pas d'un outil de plus venant d'autres disciplines et que nous adoptons à nos besoins mais, au contraire, d'une technologie et d'une méthodologie profondément enracinées dans la géographie même. Comme l'analyse statistique est liée aux mathématiques, l'élaboration et l'usage des SIG sont propres à la géographie sans pour autant que notre discipline en puisse revendiquer l'exclusivité. Gutiérrez Puebla et Gould (1994) pensent que le SIG, par son caractère intrinsèquement géographique (c'est-à-dire spatial) pourrait, sinon combler le fossé, mais au moins établir des passerelles entre les différentes géographies (humaine, physique, ...), même si certains géographes essaient encore d'enfermer le SIG dans le prolongement de la géographie quantitative. D'autres géographes expriment la crainte que le SIG renforce la dangereuse tendance qui consiste à travailler sans lien avec la réalité du terrain. Ce travail de terrain, qui fut toujours un signe distinctif des géographes, nous semble pourtant loin d'être éclipsé par l'ordinateur. Non seulement le besoin d'acquérir des données sur le terrain persiste, mais l'abstraction, la simplification et la modélisation inhérentes à la représentation numérique de la réalité rendent le contact incessant avec le terrain encore plus indispensable. Si la tentation existe (comme pour toute autre technique), les premières déceptions ont rendu le regard du géographe plus critique et ont ôté aux SIG leur aura quelque peu magique qui embrouillait encore les esprits au début des années 1990. Ces péchés de jeunesse et les désillusions auxquelles ils ont conduit n'ont en rien freiné l'extraordinaire diversification des applications.

1.1. Aux racines méthodologiques de la géomatique

Au cours des trente dernières années sont apparues, dans le sillage des avancées technologiques qui ont conduit à l'informatisation de nos sociétés, nombre de techniques d'acquisition, de traitement et de représentation de données géoréférencées. Celles-ci ont considérablement enrichi les méthodes d'investigation géographique existantes et sont à la base de l'essor de la télédétection et des systèmes d'information géographique. Qualifiées d'abord de « nouvelles technologies », ces techniques reposent toutes sur le passage de l'analogique au numérique. Passage obligé qui, par la transformation du signal continu en signal discrétisé, a permis dans un premier temps un traitement beaucoup plus rapide et engendré, par la suite, des applications jusqu'alors non réalisables.
Les racines de la télédétection et des SIG remontent aux années 1970. Si l'essor du traitement d'image satellitale a été rythmé par la mise en oeuvre de programmes de satellites d'observation de la Terre à haute résolution (Landsat, Spot), les SIG ont une double origine: cartographique et attributaire. D'un côté, les efforts d'automatisation de la cartographie - on parle de la conception cartographique assistée par ordinateur (CCAO) - ont abouti à des logiciels capables de décrire géométriquement l'espace géographique. Parallèlement, le traitement efficace de grandes quantités de données a été rendu possible grâce au développement de systèmes de gestion de bases de données (SGBD). Le géoréférencement de ces données, qualifiées dès lors d'attributaires, et leur rattachement à des entités géographiques représentant l'espace, a ouvert la voie à un traitement de l'information incluant la dimension spatiale - une caractéristique inhérente aux SIG.
Dans les années 1990 apparurent les premières études historiques sur la géomatique et notamment les SIG, avec la particularité que nombre de protagonistes-clé occupaient encore des positions de responsabilité. En 1991, Coppock et Rhind proposèrent une des premières études sur les origines des SIG. C'est également à cette époque qu'ont paru les premières publications autobiographiques (Steinitz, 1993; Thoen, 1997). Toujours dans les années 1990 (selon Mark et al., 1997), les SIG ont été inclus nommément dans le débat sur les politiques de la connaissance et la responsabilité sociale de leur usage (Pickles, 1991, 1995 ; Lake, 1993 ; Miller, 1995). Taylor (1990, cité dans Mark et al 1997) en vient même à parler de géographes quantitativistes recyclés n'ayant pas entendu les critiques contre l'impérialisme de l'analyse spatiale et profitant d'une vague de modernisme progressiste (qualifié aussi de post-industrialisme naïf). Concernant l'éthique de l'usage de la technique, Smith (1992) qualifia la première guerre du Golfe comme la première guerre SIG. Dans ce contexte, Feenberg (1995) évoqua un « déterminisme technique ».
Mark et al. (1997) insistent, dans leur présentation du *GIS History Project*, sur le fait que les SIG dominant actuellement le marché s'appuient sur une programmation et des modèles de données qui, intellectuellement et conceptuellement, ont leur origine dans les innovations des années 1960. La nature des SIG actuels ne peut être complètement comprise sans une mise en perspective historique. Ce projet de recherches historiques sur le champ technologique mais aussi social des SIG a été décidé en 1996 par le NCGIA et défini dans l'axe de recherche n° 19 intitulé : *GIS and Society: The Social Implications of How People, Space, and Environment are Represented in GIS* (Harris et Weiner, 1996).

Avant de présenter un bref historique de la géomatique, il est utile de replacer l'essor, notamment des SIG, dans le contexte historique général de l'évolution technologique et méthodologique.

Le SIG est d'abord un concept dynamique et relationnel. Il dépasse de loin le caractère statique d'une banque de données. Cette mise en relation de données différentes mais localisées dans l'espace afin d'en produire une information utile est un trait caractéristique de l'Homme et indispensable à sa survie et son épanouissement matériel. On pourrait dire que le SIG ne fait que quantifier un schéma de pensée, de traitement et de représentation profondément ancré dans l'histoire de notre espèce. Ainsi, la géologue américaine Paula Messina (Messina, 2004) estime que les premières peintures rupestres – au-delà de l'aspect artistique – constituent un SIG conceptuel dans la mesure où ces représentations associent souvent plusieurs données ancrées dans l'espace (fig. 1).

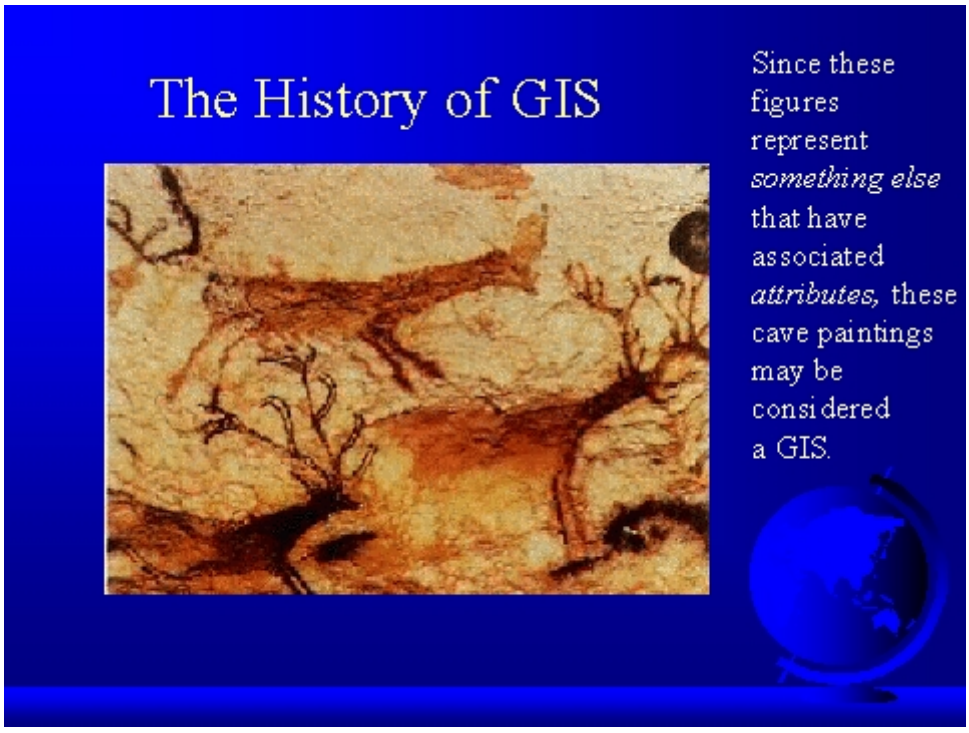


Fig. 1 : Des origines des SIG. *Source : Messina, 2004*

Nombreux sont les auteurs qui insistent sur quelques exemples célèbres d'usage et de superposition (physique ou mentale) de cartes thématiques (voir par exemple : NCGIA, 1990 ; Mark et al., 1997) :

- Le cartographe français Louis-Alexandre Berthier dressait des cartes avec calques superposés et rabattables montrant des mouvements de troupes lors de la bataille de Yorktown (guerre d'indépendance américaine, 1781).
- Au milieu du 19ème siècle, l'atlas pour accompagner le second rapport de la commission irlandaise des chemins de fer montrait en superposition la population, le flux de trafic, la géologie et la topographie.

- En septembre 1854, le docteur John Snow pointait sur une carte (fig. 2) les lieux de décès attribués au choléra dans le centre de Londres, afin de localiser la source provoquant la contamination. Il s'agit en l'occurrence d'une analyse géographique simple associant des attributs thématiques à leur position géographique.

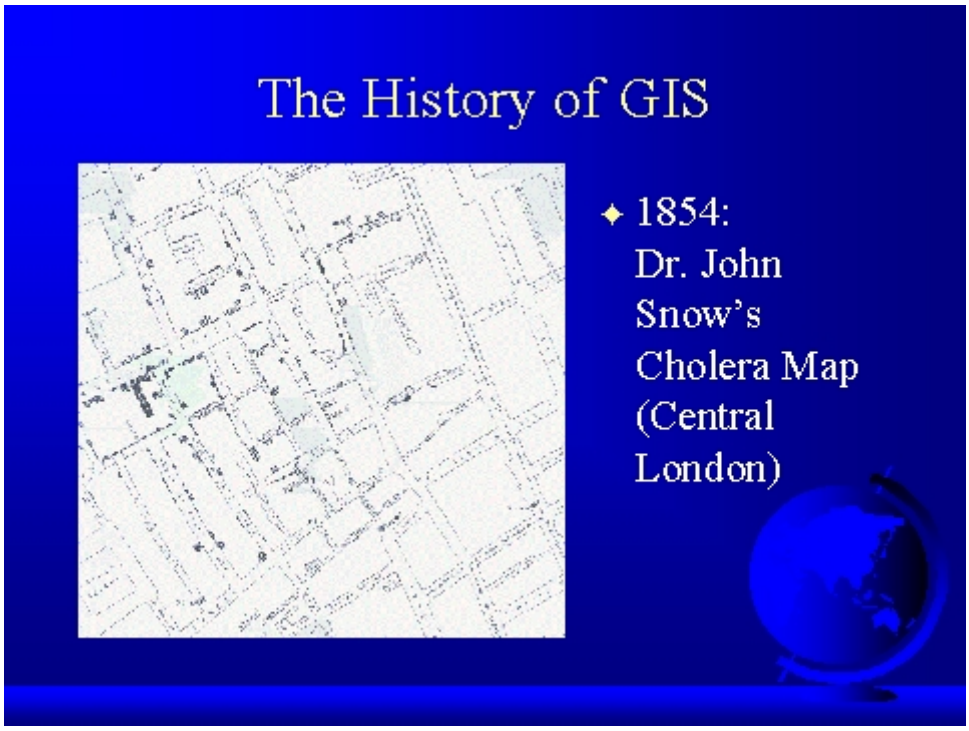


Fig. 2 : Carte de cas de choléra en 1854 à Londres établie par John Snow. *Source : Messina, 2004*

- Jacqueline Tyrwhitt (1950 citée par Chrisman, 1988) fut parmi les premiers à traiter de la superposition de cartes en tant que méthode.
- McHarg utilisa la méthode de superposition et de masque (fig. 3) dans son célèbre ouvrage « Design with Nature » (1969).

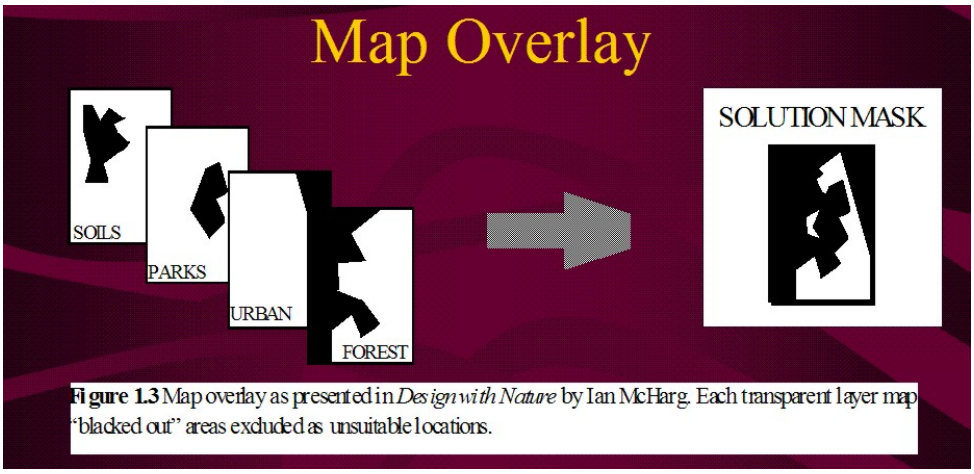


Fig. 3: Méthode de superposition de cartes d'Ian Mc Harg. *Source : Mc Harg, 1969 (cité par Clarke, 2000)*

Même si de nombreux concepts de l'analyse spatiale s'appuient sur des travaux de la période d'après-guerre (celle de la géographie dite quantitative), il convient de mentionner des avancées spectaculaires dans le domaine de l'organisation de l'espace et de la centralité des lieux exposées par Christaller (1933) dans son célèbre ouvrage sur le modèle de répartition des villes et de leurs aires d'attraction. Pour mesurer l'attractivité des biens et services, il discrétisa l'espace en unités de même taille et forme. Leur forme hexagonale assure que tous les pixels voisins le sont à la même distance d'un hexagone considéré central ce qui constitue un avantage par rapport à la forme carrée des pixels. Un second avantage de l'hexagonalisation d'un espace est le fait que tous les pixels sont des voisins de face évitant ainsi les problèmes topologiques classiques en analyse spatiale : y a-t-il continuité entre deux pixels de forme carrée se touchant en diagonale ?

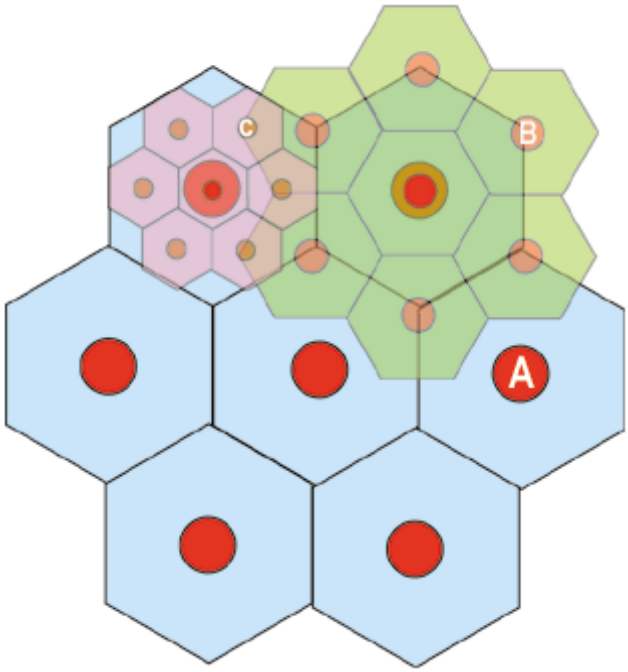


Fig. 4 : La centralité spécifique de biens et services. *Source : Gerhard-Mercator-Universität, Duisburg, 2002*

Comme Mark et al. (1997), Convis (1997) remonte dans l'histoire des SIG jusqu'aux progrès spectaculaires du 17ème siècle en cartographie, en insistant sur l'impulsion donnée par de nouvelles projections cartographiques et d'avancées géodésiques (notamment de Cassini, basées sur un calendrier du mouvement des lunes de Jupiter, cf. aussi fig. 5).

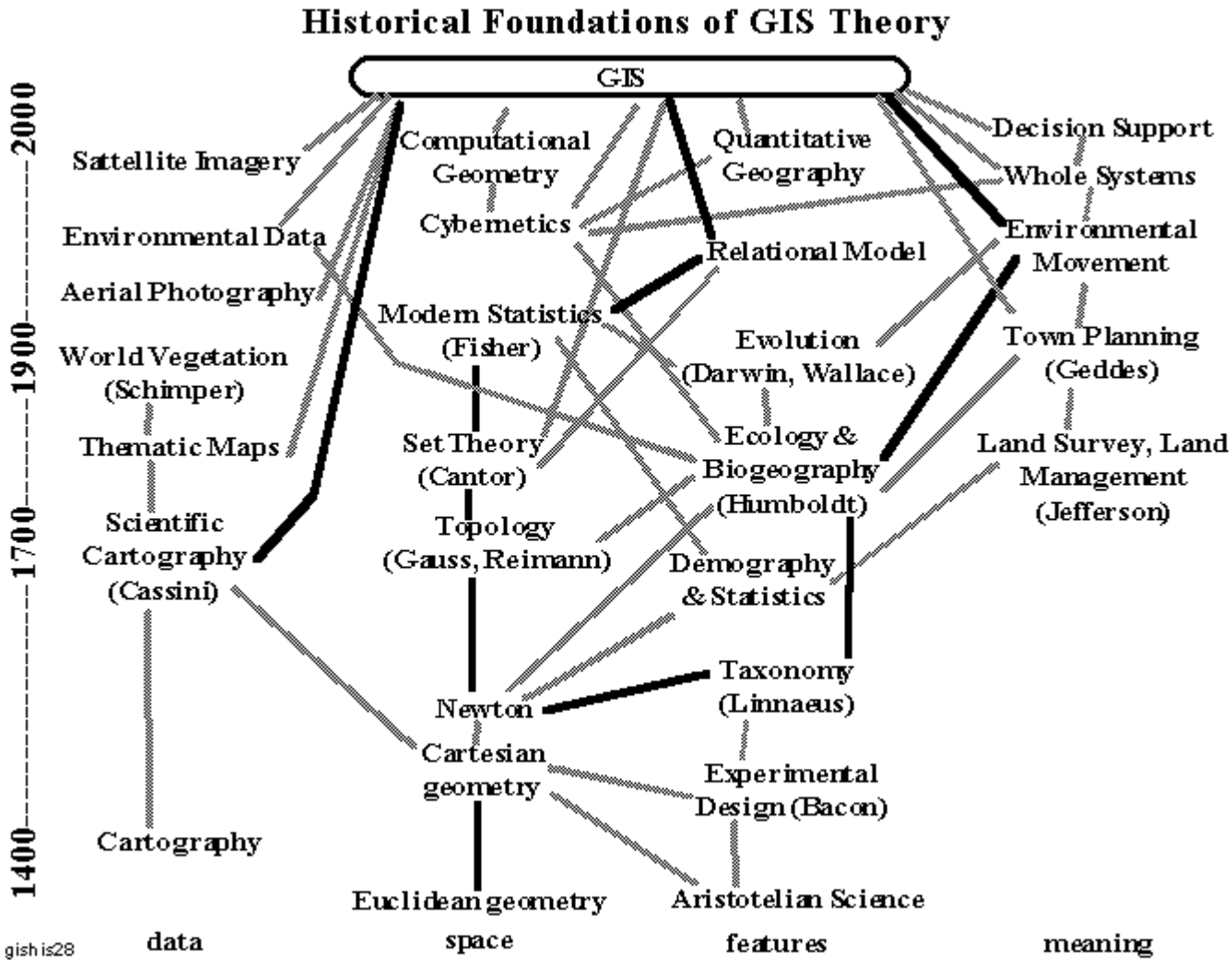


Fig. 5 : Fondements historiques des SIG. *Source : Convis, 1997*

Le même auteur compare l'évolution centenaire de l'automobile à celle des SIG durant les dernières trente années. Outre la fiabilité et l'accessibilité accrues, l'auteur insiste sur le rôle majeur des réseaux et de l'intégration des différents sous-ensembles de la géomatique.

Au niveau méthodologique, les années 1950 et 1960 ont été marquées par des avancées conceptuelles dans le domaine de l'analyse spatiale, comme le montrent les quelques exemples listés ci-dessous :

- Discrétisation de l'espace par un carroyage régulier pour l'étude de phénomènes de répartition et de diffusion - antécédent de l'approche raster (Hägerstrand, 1952).
- Conceptualisation vectorielle et représentation des objets par éléments géométriques (points, lignes, polygones) par Bunge (1962) – représentant éminent de la géographie théorique.
- Conceptualisation de l'espace et de ses propriétés fondamentales (distance, orientation, connectivité) par Nystuen (1963), chercheur, comme Bunge et Berry, au Département de Géographie de l'Université de Washington.

- Description des propriétés topologiques à l'aide d'études de réseaux de transports (entre autres: Kansky, 1963). Application à des plans de transports intégrés des villes de Detroit et de Chicago dans les années 1950 et 1960 (routes, origines, destinations, flux et volume du trafic, cf. entre autres GISCA, 2004).
- La matrice de Berry (1964, 1968) : une matrice géographique des lieux et de leurs caractéristiques (on dirait aujourd'hui en langage géomatique correct : attributs) servant à des études régionales par superposition des différents plans d'information thématiques et à des études systémiques, en procédant à une analyse détaillée d'une couche thématique.
- Développement de traitements statistiques appliqués à l'information géographique – débuts des géostatistiques : variographie, krigeage (Matheron, 1962).

Ces approfondissements conceptuels s'inscrivent dans une période de progrès importants à la fois techniques (invention du processeur) mais également sociaux (amélioration générale du niveau d'éducation, mobilité accrue), participant au développement d'une certaine conscience environnementale.
Au milieu des années 1960 les concepts fondamentaux sur lesquels reposent les SIG actuels étaient, pour l'essentiel, acquis. Manquaient cependant à l'époque les moyens physiques de les mettre en œuvre.

1.2. De la phase pionnière à l'ordinaire géomatique

L'évolution historique des SIG est retracée dans nombre de publications. La plupart des auteurs distinguent trois ou quatre phases. Selon Comas et Ruiz (1993) nous pouvons distinguer quatre phases d'évolution:

- 1950 – 1965 : phase pionnière pendant laquelle le développement et les applications en matière de SI reposaient essentiellement sur des efforts individuels rendus possibles par l'informatisation de certains laboratoires.
- 1965 – 1980 : période marquée par une augmentation sensible des initiatives collectives, notamment des instances gouvernementales et des administrations en charge de la gestion territoriale.
- 1980 – 1990 : phase commerciale. C'est à partir de ce moment que les SIG commencent leur essor véritable, impulsé par des industriels développant un nombre important de logiciels et produisant l'information numérique.
- A partir du début des années 1990 : phase d'implantation et de généralisation. Grâce aux effets conjugués de la baisse des prix du matériel et des logiciels et d'une maturation des logiciels SIG, ces derniers s'étendent et s'intègrent massivement dans des structures de traitement de l'information. Après la commercialisation débutante des années 1980, la concurrence entre les développeurs est devenue telle que l'utilisateur peut non seulement se procurer un SIG à un prix accessible aux petites structures mais surtout accéder à des

applications davantage adaptées aux besoins spécifiques de l'utilisateur. Les produits s'adaptent à la demande.

	1950	1960	1970	1980	1990
Technologies	Premiers ordinateurs	CAO → CCAO → SIG →	Landsat → SIG vectoriels	SPOT → Ordinateurs PC	→ Intégration GPS, image - objet Aide à la décision SIG multimédia SVG
Utilisateurs	Militaires	Universités US et britanniques LCGSA USGS USCB CGIS	INSEE Ministère de l'Equipement IGN OS	Collectivités territoriales Bureaux d'études Structures multinationales	Municipalités
Applications	Atlas de la Fore britannique	Recherche et enseignement CGIS	Aménagement urbain DIME, GIRAS RGU Arc/Info	BD CARTO de l'OS Gestion de réseaux	BD IGN Cartographie interactive

Fig. 6 : Chronologie schématique des SIG. *Inspirée de Comas et Ruis, 1993 ; modifiée*

Les différentes chronologies mettent en évidence les origines multiples des SIG, notamment la CAO et la CCAO, mais montrent également qu'ils sont enracinés dans le traitement de l'information en général, les statistiques et la télédétection (cf. fig. 6).
Un autre point à souligner est l'essor parallèle des SIG dans plusieurs pays où des équipes basées notamment aux Etats-Unis, au Canada et en Grande Bretagne avaient pour objectif de créer des systèmes capables de traiter l'information spatiale. Ces équipes, qui travaillaient indépendamment les unes des autres, étaient rattachées à des grandes administrations, des organismes publics, des universités ou, plus rarement, à des entreprises privées du secteur informatique. Si les administrations étaient plutôt intéressées par des systèmes de représentation et de traitement de l'information géographique (CCAO), les programmes de recherche étaient davantage axés sur le développement d'outils d'analyse des données spatiales.
Enfin, il est nécessaire de mentionner le moteur général de cette évolution: les progrès du secteur d'informatique. La montée en puissance des ordinateurs (vitesse de traitement, capacités de stockage) était et reste exponentielle. S'il fallait retenir une date de cette évolution rapide et riche en événements, il s'agirait probablement de 1981 avec l'apparition des premiers PC (Personal Computer) d'IBM.

Gutiérrez Puebla et Gould (1994) proposent un découpage chronologique légèrement différent:

- Etape pionnière (années 1965 - années 1975) : auparavant les ordinateurs n'étaient guère disponibles pour un usage civil cartographique ou géographique. Durant cette phase le premier SIG - le SIG de Canada (**CGIS**) - voit le jour, la première structure vectorielle à propriétés topologiques (**DIME**) et les premiers SIG raster (**SYMAP, GRID**, ...) sont élaborés. Selon Goodchild (1992), il s'agit de l'époque où les applications cherchaient une technologie adéquate, c'est-à-dire que l'on visait à faire numériquement ce que l'on savait faire analogiquement.
- Etape de résolution de problèmes techniques (années 1970 et 1980). Notamment les universités américaines (en liaison de plus en plus étroite avec des industriels) développent des algorithmes ou des concepts de traitement de l'information géographique : croisement de plans vectoriels, le format TIN, normalisation et intégrité des données. Outre la résolution de problèmes existants, les progrès fulgurants des microprocesseurs et d'autres composantes hardware procurent une capacité de travail qui fit naître des besoins nouveaux.
- Etape de commercialisation (à partir des années 1980) : arrivée sur le marché des premiers SIG abordables et stables (Arc/Info). En même temps les prix des mini-ordinateurs, des stations de travail mais surtout des micro-ordinateurs et des périphériques (table à digitaliser, table traçante, ...) baissent.

Mark et al (1997) reconnaissent dans leur projet sur l'histoire des SIG plusieurs critères de développement des SIG avec des périodicités se chevauchant partiellement :

- Le passage du rôle moteur du secteur public vers le secteur privé. Durant les années 1950 et 1960 le développement des SIG a lieu surtout dans le secteur public tandis qu'à partir des années 1970, mais surtout de la décennie suivante, on assiste à un développement vigoureux d'une industrie SIG essentiellement US-américain. Frost et Sullivan (1995, in : Mark et al., 1997) parlent à propos des logiciels, données et services SIG d'une industrie de 2 milliards de $US avec un taux de croissance annuel de vingt pour cent.
- A partir des années 1990 : un regard plus critique sur la géomatique (cf. ci-dessus), signe d'un certain impact sinon de dominance.
- L'influence majeure des SIG sur la géographie (à partir des années 1980) : si certains y voient un facteur pour ranimer une géographie académique (Albers, 1988) pour d'autres la géomatique n'a qu'un impact néfaste qui déforme la discipline.

Selon Dao (2002), « l'évolution et la diffusion des SIG dans la science et l'aménagement du territoire est à mettre en lien avec les développements de la technologie informatique, de la conscience environnementale et des nouvelles approches scientifiques transdisciplinaires, intégratrices ». L'essor des SIG est donc caractérisé par une boucle de rétroaction positive : plus les prix du matériel, devenant plus performant, baissent, plus les SIG deviennent performants et se répandent. Cette démocratisation impulse à son tour, par effet de masse, l'évolution du marché: baisse des coûts de production, stimulation de la recherche etc. Parallèlement nombre d'auteurs citent le rôle de la prise de conscience environnementale (planétaire) dont les traits essentiels – caractère systémique, complexe et transfrontalier – requièrent un traitement numérique de données géoréférencées. A ce propos Dao évoque notamment le sommet de la Terre à Rio en 1992 et ses suites où la nécessité du « développement des outils tels que systèmes d'information géographique » est soulignée (chapitre 112 de l'Agenda 21 de l'ONU – 23-27 juin 1997).

Le GISCA (National Centre for Social Applications of GIS), rattaché à l'University of Adelaide, South Australia (2004) propose une lecture de l'histoire des SIG en quatre étapes, un découpage emprunté aux innovations technologiques en général:

- Initiation : cette phase est définie par le fait qu'une innovation devient disponible. Pour les SIG, les auteurs situent cette période de la fin des années 1950 au début des années 1970.
- Contagion : une phase pendant laquelle l'innovation est largement testée. Ce qui fut le cas des SIG, selon le GISCA, de la moitié des années 1970 au début des années 1980 (première commercialisation de logiciels SIG, disponibilité des premiers micro-ordinateurs et première mise en application de nouvelles idées).
- Coordination : une phase pendant laquelle les applications les plus prometteuses d'une innovation se cristallisent et connaissent un développement concerté. La coordination des expérimentations fait baisser les coûts élevés de développement et d'implémentation. Les SIG ont atteint ce stade à la charnière des années 1980 et 1990. Points forts et faiblesses de nombre de techniques géomatiques devinrent apparents.
- Intégration : l'innovation est acceptée et intégrée dans des tâches de recherche routinières. Les auteurs voient des signes que ce stade est atteint par les SIG à partir de la fin des années 1990. Ainsi, selon le GISCA, les technologies d'information ont infiltré chaque aspect de la recherche géographique mais leur intégration complète dans la discipline peut durer encore des années.

Ce processus d'évolution et de maturation des SIG est illustré par Callahan (2002) dans la fig. 7 avec laquelle l'auteur insiste sur le rôle considérable que des progrès en informatique et l'intégration dans le réseau Internet jouent pour l'évolution et la diffusion des SIG.

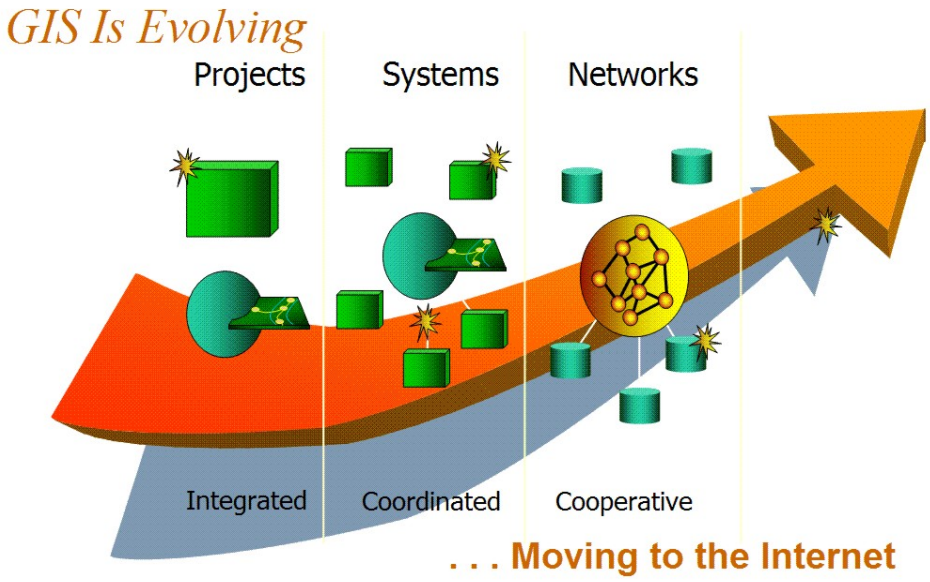


Fig. 7 : Evolution et maturation des SIG. *Source : Callahan, 2002*

Ce concept de maturation est largement partagé par la plupart des auteurs cités. Suite à la disponibilité d'une innovation (technique, conceptuelle) se produit un foisonnement de recherches dont l'aspect pluridisciplinaire nécessite un considérable effort de structuration. Cette situation, atteinte par la géomatique autour des années 1980, est remarquablement

décrite par Scholten et LoCascio (1997) qui ironisent sur les balbutiements des SIG en empruntant un dialogue entre Winnie Pooh et Porcinet :

"...Piglet, 'what are you doing?' 'Hunting,' said Pooh. 'Hunting what?' 'Tracking something,' said Winnie-the-Pooh mysteriously. 'Tracking what?' said Piglet, coming closer. 'That's just what I ask myself. I ask myself, What?' 'What do you think you'll answer?' 'I shall have to wait until I catch up with it,' said Winnie-the-Pooh." (The World of Pooh, A. A. Milne, 1978).

Quelques étapes marquantes de l'histoire des SIG

Beaucoup d'organismes de recherche et de portails Internet (CGER, 1997 ; gisdevelopment.net, 2004 ; Wisconsin State Cartographer's Office, 2001 ; CASA, 2000) proposent des chronologies de la géomatique. Nous optons plutôt pour la présentation d'un certain nombre de réalisations ayant marqué l'essor des SIG. Nombre d'auteurs (entre autres : Pornon, 1990 ; Rouet, 1992 ; Laurini et Thompson, 1992; Comas et Ruiz, 1993; Taylor, 1994 ; Mark et al., 1997) citent un certain nombre de ces *milestones* de la géomatique. Ces produits, technologies ou concepts illustrent aussi le rôle prédominant des pays anglophones dans ce domaine. Nous allons décrire succinctement:

- le SIG de Canada (CGIS)
- la structure DIME (US Bureau of Census)
- GIRAS (USGS)
- le Minnesota Land Management System (MLMIS)
- le LCGSA de la Havard University
- le concept TIN (Triangular irregular network)
- la société ESRI
- apports européens
- les débuts en France.

CGIS - Canadian Geographic Information System (1966)

Le CGIS est considéré comme le premier SIG fonctionnel. Développé sous la direction de Roger Tomlinson (Tomlinson, 1988) travaillant à cette époque pour le Ministère de l'Agriculture en collaboration avec IBM, il fut mis au point pendant les années 1960. Le système, opérationnel en 1971, était conçu pour un inventaire forestier du territoire canadien (système dédié). Pour cela CGIS devait analyser les données produites par l'inventaire canadien (Canada Land Inventory – CLA) qui étaient surtout d'ordre pédologique, forestier et de potentialité pour l'agriculture et la faune sauvage. Au total le CLA produisait 7 plans thématiques avec un codage relativement simple. Ainsi la qualité des sols était jugée sur une échelle de 1 (meilleur sol) à 7. L'objectif était l'analyse d'une base de données localisées avec une expression des résultats uniquement statistique en vue de l'aménagement rural. Confrontée à la difficulté de manipuler un nombre important de cartes (1 : 50 000) couvrant le territoire canadien à une échelle adaptée, l'équipe de Tomlinson se pencha sur l'acquisition automatique des données en concevant le premier scanner. Les images scannées furent ensuite vectorisées par un programme spécialement écrit pour CGIS.
Dans nombre de domaines, CGIS accomplit un travail pionnier repris par la plupart des SIG postérieurs, en particulier dans les domaines suivants :

- Utilisation de la technique de scannage comme source de numérisation
- Vectorisation des cartes scannées
- Division de cartes en feuilles et concaténation de ces feuilles par les coordonnées des coins
- Division de l'information représentée en couches (plans) d'information
- Division entre données de localisation et données attributaires
- Structure vectorielle arc / nœud avec reconnaissance de polygones en tant que arcs fermés pourvus de pointeurs pour les polygones situés des deux cotés et liens relationnels entre arcs et polygones (codage de la topologie)
- Algorithmes de croisement de plans topologiques
- Utilisation d'un référentiel absolu dont la précision était adaptée à la résolution des données

Selon Mark et al. (1997), CGIS est toujours opérationnel en tant que SIG travaillant à petite échelle.

DIME - Dual Independent Map Encoding

L'importance de DIME réside dans sa structure de données. Développé par le United States Bureau of Census (USBC) - l'équivalent américain de l'INSEE - DIME fut créé pour le recensement de 1970. Le but était de reproduire le réseau des limites administratives, hydrographiques et des voies avec aux extrémités des tronçons (arcs) les adresses - tout ceci pour 350 agglomérations. Ce système dont s'est inspiré en France le RGU (Répertoire Géographique Urbain) a été reconduit en 1980. A partir du recensement de 1990, le bureau de recensement a créé une base de données plus complète nommée TIGER (Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing system ou base de données géographiquement référencées et topologiquement intégrées).
L'histoire de DIME (appelé également GBF-DIME – Geographic Base file) commença en 1965 avec le lancement d'une cellule pilote proposant, en 1966, CUS (Census Use Study - zone test) New Haven (Connecticut) (Smith, 1967). Ce projet pilote identifia vite les principaux problèmes : redondance de saisie d'arcs et inconsistance dans bases de données dont la conception n'était pas normalisée. La structure DIME (cf. ci-dessous) a été inventée et publiée 3-4 mois plus tard (Cooke, 1997). Des fichiers GBF-DIME ont été établis pour toutes les villes US américaines durant les années 1970.
La seule ombre au tableau de cette *success story* est le fait que l'équipe du CUS travaillait de façon relativement isolée et n'a pas su (ou voulu) intégrer des concepts au moins aussi performants. Mark et al. (1997) font remarquer qu'en 1964, Robert Dial (Dial, 1964) publiait les résultats d'un programme de recherches portant sur un système de conversion d'adresses de rues : SACS (Street Adress Conversion System). Un des points innovants de SACS consistait à indexer des nœuds selon un maillage. Un des membres du projet Census Use Study, Donald Cooke affirma que son équipe n'en était pas au courant en … 1967 (Cooke, 1997 cité par Mark et al., 1997).
La structure DIME matérialise la première tentative aboutie d'une cartographie schématique de l'espace. L'unité de base de cette cartographie de desserte de l'espace est l'îlot (polygone), bordé de voies ou de limites administratives (arcs). Chaque carrefour (nœud) est renseigné par les numéros de rue.

Le nom « double codage » fait appel aux relations topologiques entre îlots (polygones) et voies (arcs). A partir d'un îlot, il est possible d'obtenir de l'information sur les voies qui le bordent et vice versa (cf. fig. 8).
Codant les segments de rue par des identificateurs d'îlots urbains à droite et à gauche et d'identificateur de nœuds de départ et d'arrivée, la structure des données est largement inspirée du codage des arcs mis en place pour CGIS et de POLYVRT.
Développé pour analyser le recensement de 1970, DIME fut le premier outil à haute résolution (îlot urbain) de planification et d'aménagement urbain. Son histoire est notamment retracée par Cooke (1997). DIME et TIGER ont largement inspiré des produits manipulant des données vectoriels en réseau comme les systèmes d'aide à navigation embarqués au bord de véhicules, l'optimisation de circuits commerciaux et de plans de secours. Les données TIGER font partie du réseau de données géoréférencées US américain NSDI (National Spatial Data Infrastructure).

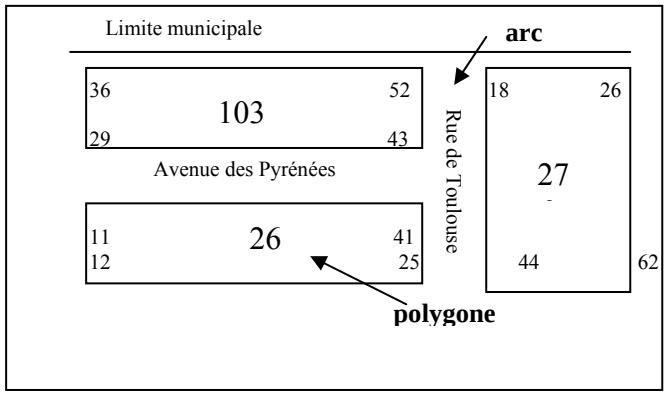


Fig. 8 : Exemple de la structure DIME

L'USBC a publié une bibliographie importante sur DIME et TIGER dans sa page Web (Census, 1994).

GIRAS - Geographical Information and Retrieval Analysis System

GIRAS, conçu en 1973 par l'USGS (United States Geological Survey - l'équivalent américain du BRGM), est le second exemple du rôle moteur des administrations américaines dans l'évolution des SIG. L'USGS avait besoin d'un système capable de gérer et d'analyser tout type d'informations concernant les ressources et les potentialités des sols. GIRAS permit de traiter la couverture et l'usage des sols. Dans sa seconde version GIRAS gérait la conversion entre plans raster et vectoriels.

MLMIS – Minnesota land Management System

Il s'agit d'une coopération entre deux administrations de cet Etat en charge de l'aménagement (Minnesota State Planning Agency et Center for Urban and regional Affairs) et l'université du Minnesota. Contrairement à d'autres SIG pionniers, le MLMIS s'imposa comme outil d'aménagement et de gestion. Techniquement, MLMIS était un SIG en mode raster avec une

résolution du pixel de 40 acres (conforme aux données d'imposition). Malgré cette faible résolution le système avait plus de 200 clients à la fin des années 1970 (Mark et al., 1997).

Le LCGSA (Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis)

Créé par Howard FISHER en 1966 comme Havard Laboratory for Computer Graphics (LCA) et renommé plus tard en LCGSA (ajout de la composante d'analyse spatiale), le LCGSA, rattaché à la Graduate School of Design, Havard University, était le centre d'innovation en matière de logiciels de cartographie et de SIG jusqu'à la fin des années 1970 (Chrisman, 1988).
Parmi les nombreuses réalisations du Harvard Laboratory, on peut citer notamment :

- SYMAP, commencé en 1964 et publié en 1968, ce logiciel de cartographie automatique calculait des cartes d'isolignes et de choroplèthes. SYMAP fut le premier logiciel commercialisé ayant des fonctionnalités SIG. Les sorties papier n'étaient possibles qu'avec des imprimantes à ligne (sous forme de caractères du code ASCII).
- CALFORM, développé à la fin des années 1960 et sorti en 1970 est une amélioration de SYMAP utilisant des tables traçantes afin de produire des cartes de meilleure qualité. CALFORM offrait aussi une certaine mise en page cartographique (légende, Nord géographique).
- SYMVU (fin des années 1960) : logiciel calculant des vue 3D perspectives à partir des données de SYMAP.
- GRID (fin des années 1960), SIG en mode raster, ajoutait à SYMAP notamment la possibilité d'acquérir plusieurs plans d'information et de les croiser en s'inspirant des idées de McHarg (1969).
- POLYVRT (début des années 1970) permettait notamment la conversion entre plusieurs formats de données pour décrire des objets surfaciques. Ainsi SYMAP codait chaque polygone séparément, CALFORM enregistrait les limites internes en double, …
- ODYSSEY (milieu des années 1970), basé sur POLYVRT, il est considéré comme premier logiciel SIG vectoriel stable pour la conversion de formats vectoriels et le croisement de plans vectoriels pourvu d'un algorithme d'élimination de polygones fantômes.

Victime de son succès, l'influence du LCGSA sur l'évolution du secteur devenait moindre à la fin des années 1970. Son rôle fondamental durant les années 1970 se reflète dans le nombre de spécialistes y ayant été formés. Ainsi, on peut citer J. Dangermond (présidant d'ESRI par la suite), L. Jordan (président d'ERDAS) et, comme chercheurs ou professeurs éminents, C.D. Tomlin, T. Peucker et nombre d'autres.

TIN (Triangular Irregular Network)

Ce modèle numérique de terrain en mode objet représentant les oints cotés comme sommets de triangles irréguliers est intéressant dans la mesure où il fait l'objet de plusieurs mises au point apparemment parallèles et non connectées. Ainsi Mark et al. (1997) parlent d'une triple

invention (Thomas Peucker du TIN-projet ; USA – Canada ; ESRI et Christopher Gold à l'époque dans une société privée). Il s'agit en l'occurrence clairement d'un exemple de la phase pionnière de la géomatique, marquée par une coordination encore faible (phase de contagion selon le GISCA, 2004)

ESRI (Environmental Systems Research Institute)

Le marché des SIG, des logiciels CCAO et assimilés commençait à s'établir pendant les années 1970 en Amérique du Nord. Parmi la multitude d'entreprises, ESRI a su influencer le secteur des SIG par sa constance sur le marché dès ses débuts (Dangermond et Smith, 1988). Créé par un ancien étudiant de Havard, J Dangermond, en 1969, ESRI est surtout connu pour son logiciel vedette : Arc/Info - devenu la référence dans le domaine Il s'agit d'une association d'une base de données relationnelle (INFO) à un logiciel de manipulation d'objets géographiques codés sous forme d'arcs (ARC). Arc/Info, initialement inspiré de CGIS et d'Odessey, domine le marché depuis 20 ans grâce à des améliorations et ajouts de fonctions incessants, sa disponibilité sur PC (depuis 1986) et sur des PC bureautiques (desktop) depuis 1991 (ArcView). ESRI n'est pas le seul exemple de création de sociétés de logiciels et de services géomatiques. Ainsi la société Intergraph a été fondée en 1969 sous le nom de M&S Computing Inc. D'autres sociétés suivirent : ERDAS, Laser-Scan, MapInfo, SmallWorld, …

Apports européens

Tous les exemples cités jusqu'ici (personnes, institutions, techniques) sont d'origine nord-américaine.
Les innovations européennes concernent surtout le domaine de la cartographie automatique assistée par ordinateur et le secteur des bases de données géoréférencées. Mark et al. (1997) et Rhind (1988) attribuent ce fait notamment à l'existence d'une multitude de services cartographiques nationaux (voire régionaux : Allemagne, Espagne) comparé à la situation US américaine où la cartographie topographique civile est l'affaire exclusive du US Geological Survey (USGS), outre le volet militaire (Defense Mapping Agency). Selon les mêmes auteurs, une autre différence consiste dans la multiplicité des tâches incombant aux agences cartographiques européennes qui doivent, souvent, gérer également la cartographie cadastrale et parcellaire.
La plupart des auteurs ne signalent que le rôle de l'Ordenance Survey (OS) britanique (Bosque Sendra, 1992 ; Comas et Ruiz, 1993 ; Gutiérez Puebla et Gould, 1994) en tant que contribution européenne majeure à la géomatique. L'OS commença en 1973 son programme d'une couverture cartographique digitale (1 : 230 000) terminé en 1995 (pour comparaison : l'USGS acheva son programme d'une couverture cartographique topographique du pays en 1991). Le projet visait à réaliser des cartes à la demande sur un traceur A1, dans l'un des points de vente, dans les minutes mêmes qui suivent la commande. Diverses adaptations (échelle, thèmes rajoutés ou couches supprimées) permettent une adaptabilité impossible en analogique. La vente sur support informatique est également possible. Les avantages du projet sont multiples: diminution du coût d'édition, élimination du coût de stockage et remise à jour en continu n'étant plus rythmées par les intervalles de réimpression. Une autre différence notable entre la situation britannique et celle aux Etats-Unis est le fait qu'aucune entreprise privée britannique n'a su prendre une dimension comparable à celle d'ESRI ou d'ERDAS

outre-Atlantique. Par contre, la recherche et les possibilités d'application des SIG y furent étudiées directement par des instances gouvernementales (DoE, 1987).
Mark et al. (op. cit.) évoquent également quelques tentatives d'une cartographie cadastrale numérique précoce en Suède et en Autriche. L'exemple de l'OS britannique a été notamment suivi par l'IGN français. Toujours selon les mêmes auteurs, la Grande Bretagne et la France furent dans la deuxième moitié des années 1990 les seuls pays européens disposant d'une couverture cartographique numérique complète.
Enfin, nombre d'auteurs évoquent des investissements européens précoces mais isolés dans la gestion communale, notamment cadastrale (Bâle, Lille, Newcastle).
Les sociétés européennes, pourtant apparues tôt sur le marché de la géomatique (Ferranti en Grande Bretagne, Contraves en Suisse, Koninglike Waffenfabriek en Norvège et Messerschmidt-Boelkow en Allemagne) ne connaissaient pas un développement comparable à celui des sociétés nord-américaines.
Enfin, Mark et al. (1997) citent comme frein important au développement précoce de la géomatique européenne les standards élevés en matière de cartographie imposés par les agences nationales cartographiques et la profession.

Les débuts en France

La situation française fut longtemps davantage marquée par les initiatives des administrations plutôt que par celles des centres de recherche ou leurs prolongations commerciales (Pornon, 1990). Une des premières applications au début des années 1970 fut le RGU (Répertoire Géographique Urbain) en matière de cartographie schématique. Inspiré directement de DIME, le RGU a été lancé en 1973 par le Ministère de l'Equipement et par l'INSEE. Le répertoire se base sur le réseau des voies avec les coordonnées des sommets et des points de passage. Chaque tronçon (arc) est associé à un code voie – le code RIVOLI (Répertoire Informatisé des Voies et Lieux-dits) -, à un type de voie, à une largeur entre façades, à un numéro d'îlot et au numéro d'immeuble sur les côtés. Le RGU a été mis en place dans 221 villes de plus de 20 000 habitants. Il a été créé en vue de l'exploitation du recensement de 1975 à une résolution jusqu'alors inégalée allant jusqu'à la façade d'îlot. L'expérience n'ayant été pas concluante, le RGU fa été abandonné lors des recensements suivants. Après une période creuse, nombre d'institutions ont commencé, pendant les années 1980, à lancer des programmes SIG : production de l'information numérique, programmation, formation, application.

Tendances futures

Sans prendre des risques inconsidérés, on peut prévoir que les SIG des années à venir amélioreront davantage encore leur caractéristique essentielle: être des outils fédérateurs capables d'intégrer des données hétéroclites.
Nous avons souligné que la plupart des fondements théoriques des SIG actuels étaient déjà acquis au début des années 1960. Si le développement de méthodes (géo)statistiques (analyse en composantes principales, variographie, krigging, etc.) et d'outils d'aide à la décision (évaluations multicritère et multiobjectif) a largement amélioré la compréhension de phénomènes spatiaux complexes, le cadre conceptuel encore prédominant actuellement (géométrie euclidienne, schémas d'analyse de type linéaire, …) ne permet qu'une description partielle du temporel. Or le facteur temps s'avère primordial dans l'étude de systèmes ouverts

tels que nous les analysons en géographie et pour la gestion / prévision en matière d'aménagement et d'environnement. Les systèmes capables d'intégrer la dimension temporelle sont caractérisés par des boucles de rétroaction, par une dynamique s'exprimant dans l'ensemble des interactions, par la globalité systémique et par l'acceptation d'une part d'incertitude. La récente prise de conscience du caractère limité des SIG commercialisés a orienté la recherche vers l'élaboration de systèmes exploratoires qui font appel à l'intelligence artificielle (IA), la logique floue, des réseaux neuronaux ou encore des systèmes de connaissances d'autoapprentissage (systèmes experts). Ces nouvelles méthodes commencent à enrichir la palette d'outils des SIG tout comme le multimédia, soit par couplage, soit par intégration dans les SIG actuellement sur le marché.

Il est clair que l'innovation en matière de SIG sera - tout comme elle l'était - étroitement liée aux progrès généraux en informatique (vitesse, parallélisme, nouveaux périphériques numériques, mise en réseau, …).
Outre le fait que les spécialistes s'accordent sur un avenir proche des SIG en toujours en rose (poursuite de l'expansion du marché) plusieurs tendances s'esquissent. Déjà en 1993, Comas et Ruiz soulignaient notamment divers aspects d'intégration actuellement en cours:

- Intégration de données d'origine et de nature différentes
- Intégration de technologies permettant le traitement de différents types de données (raster, vecteur, alphanumérique, sons, image) – le multimédia
- Intégration de systèmes, notamment SIG et GPS afin de réaliser des modèles évoluant en temps réel.

Les axes de recherche des prochaines années sont clairement affichés dans certains pays anglophones, toujours leader dans ce domaine. Ils résultent de concertations au sein de structures regroupant les organismes de recherche les plus compétents. Gutiérrez Puebla et Gould (1994) résument les objectifs de:

- RRL (Regional Research Laboratories) - réseau de centres de recherche britanniques fondé en 1987 par le Economic and Social Research Coucil of Great Britain
- NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis) fondé en 1988 par la US National Science Foundation (NSF) est composé essentiellement des équipes de trois universités américaines: University of California (Campus de Santa Barbara), State University of New York et University of Maine. Contrairement au RRL britannique poursuivant des objectifs de recherche et développement en étroite collaboration avec des entreprises privées, l'objectif du NCGIA se situe au niveau du développement des fondements théoriques et conceptuels des futurs SIG et de la géomatique en général.

Au début des années 1990, les thèmes prioritaires du NCGIA étaient les suivants (Laurini et Thompson, 1992):

- Autocorrélation spatiale
- Modèles statistiques pour données géoréférencées (indices d'erreur positionnelle)
- Incorporation de critères inexacts et subjectifs dans les systèmes d'aide à la décision

- Problèmes liés à l'absence d'une théorie cohérente dans le domaine des relations spatiales et des concepts spatiaux cognitifs de l'homme
- Représentation de la dynamique temporelle
- Langages de consultation pour sélectionner et traiter des données géoréférencées
- Développement de systèmes experts afin d'automatiser certaines procédures comme par exemple le dessin cartographique et la généralisation
- Développement de nouvelles formes de visualisation de l'information spatiale
- Obstacles relatifs à la diffusion de la technologie SIG (intégration Internet notamment)
- Problèmes liés à la disponibilité de données géoréférencées numériques

En 1997, la Commission on Geosciences, Environment and Resources - National Research Council (CGER, 1997) faisait ressortir plusieurs tendances marquant l'avenir de la géomatique :

- Poursuite de la miniaturisation des appareils
- Généralisation de la transmission des données sans fil
- Influence grandissante de la réalité virtuelle sur la conception et l'utilisation de données géoréférencées
- Emergence de systèmes spatio-temporels n-dimensionnels
- Apparition de programmes utilitaires facilitant la recherche et le tri de données hétérogènes

Dans un proche avenir, on peut s'attendre à une banalisation de la géomatique, comme ce fut le cas pour d'autres applications informatiques (notamment bureautiques) et à une réelle intégration multimédia et réseau.

Chapitre 2. La géomatique et sa géographie

Géomatique et géographie ont-elles des propriétés exclusives ou, au contraire, leurs évolutions imbriquées témoignent-elles d'un enrichissement mutuel ?

Dans les premières pages, nous avons rappelé ce que l'on entend par géomatique en général et système d'information géographique en particulier. Pour répondre à la question posée ci-dessus, nous devons d'abord évoquer les débats épistémologiques à ce sujet et rappeler l'accueil que la géographie a réservé à la géomatique.
Dans un second temps, nous rappellerons brièvement les fonctionnalités géomatiques utilisées communément en géographie – un éventail que allons illustrer à travers nos propres recherches dans le chapitre suivant.

2.1. Géomatique XOR géographie ou géomatique AND géographie ?

Quels sont les rapports entre géographie et géomatique ? Cette question renvoie à de nombreuses autres interrogations. Pour y répondre, ne serait-ce sommairement, elle nous oblige, en premier lieu, à nous pencher, une fois de plus, sur la définition de notre discipline : science à part entière ou carrefour des sciences ? De même, l'analyse de l'évolution imbriquée de la géographie et de la géomatique pose la question du statut scientifique de cette dernière : simple outil ou science ? Enfin, comment la géomatique, dont au moins une des racines – l'informatique – est étrangère à notre discipline, était-elle accueillie en géographie ?

Faute de pouvoir, dans le cadre imparti, examiner de manière approfondie ces questions, pourtant fondamentales pour la compréhension de notre positionnement disciplinaire actuel, nous nous limitons ici à résumer les principaux arguments et à nous centrer, dans les chapitres suivants, sur des aspects de recherches géomatiques en géographie de l'environnement ; des recherches aussi bien appliquées que méthodologiques, dont nous sommes persuadés qu'elles apportent elles-mêmes des éléments de réponse à ces questions épistémologiques.

La géographie : science ou carrefour des sciences ?

Etymologiquement, décrire la Terre est la première tâche de la géographie : écrire, décrire, inventorier, cartographier les innombrables faits et relations à la surface terrestre au sens de l'écoumène. Devant la masse de données, des spécialisations thématiques apparaissent : certains relatent plutôt la configuration physique, d'autres préfèrent décrire l'humain et son champ sociétal. Quel que soit le niveau de spécialisation retenue, la géographie s'intéresse toujours à la configuration terrestre et aux activités que l'Homme déploie dans l'espace. Chemin faisant, la géographie ne se contente plus de simplement enregistrer la configuration terrestre mais cherche à établir des liens, à expliquer, à prévoir. De la simple description, la géographie s'est muée en une science approchant son objet de recherche de manière systémique et s'enrichissant de nombreuses méthodes et techniques pour l'analyser et le modéliser. Dans ce contexte de perpétuelle mutation disciplinaire, la géomatique apporte d'abord à la géographie le traitement numérique des données géographiques. Cependant,

informatiser ce processus signifie non seulement un gain en vitesse mais, avant tout, un saut qualitatif ouvrant de nouvelles perspectives de recherches.

En France, les recherches épistémologiques sur notre discipline sont liées entre autres – et pour ne mentionner que les travaux récents – aux réflexions de Claval (1988), Bailly et Ferras (1997), Pumain et Saint Julien (1997), Marconis (2000), Robic (2001) et Pumain et Robic (2002).
Marconis (2000) place le débat sur l'identité géographique et nos relations scientifiques avec l'espace dans le contexte historique (cf. également Capel, 1977) en rappelant les critiques formulées à l'égard de nombreux travaux géographiques de l'entre-deux-guerres et de l'immédiat après-guerre. On leur reprochait notamment de considérer « l'espace comme un simple « support » dans lequel se déployaient des processus économiques et sociaux… leur géographie apparaissait souvent comme le prolongement ultime de recherches qui relevaient d'abord d'autres disciplines ».
Marconis ajoute que le retour à une géographie *science de l'espace* a été fortement stimulé par l'essor des techniques quantitativistes, employées d'abord par la géographie anglo-saxonne (cf. aussi chapitre 1, § 1) sans oublier, pour autant, les travaux précurseurs d'économie spatiale de Christaller (1933) et de Lösch (1939). En outre, le poids de la *culture géographique* pesait, à l'époque, beaucoup plus lourd (cf. aussi chapitre 3, § 1) que de nos jours dans les différentes aires culturelles de la recherche géographique. En effet, la traditionnelle orientation historique de la géographie française la coupait, dans les années 1950, des impulsions en provenance des mathématiques. Ainsi, les travaux novateurs, entre autres de Hägerstrand (1952), Bunge (1962), Nystuen (1963) et Berry (1964, 1968), sont restés longtemps relativement ignorés. Un véritable changement de paradigme n'a été déclenché que par la parution de l'ouvrage de Haggett (1972), intitulé : « Geography: a modern synthesis ». Les idées de Haggett se retrouvent également dans l'approche systémique en géographie de Brunet (1979).
Capel (1998) voit également dans l'orientation future de la géographie une focalisation sur des questions clé comme l'importance de la dimension spatiale dans les recherches géographiques et une contribution aux « concepts fondamentaux de la science actuelle comme : système, évolution, hasard, probabilité et autres».
Robic et Pumain (2003) contribuent à ce débat, sous forme d'un ensemble de citations, en se demandant si la géographie est une science à part entière. Elles relatent que déjà Ritter (1833) soulignait le fait que la géographie « ait besoin d'être stimulée artificiellement par les autres sciences et de vivre d'emprunts » avant de conclure qu'elle utilise ces *emprunts* multiples pour les appliquer de manière coordonnée à l'étude et la description de l'espace géographique – un objet de recherche central pour la géographie, qui lui confère sa spécificité disciplinaire. Ce point de vue a été, et est toujours, largement partagé par d'éminents géographes et se distingue nettement de conceptions assez réductionnistes comme celle exprimée par Sauer (1956), qui réduit la géographie à une collection de savoirs en lui refusant une ligne de recherche propre et une technique particulière. Selon Sauer, l'existence de la géographie se justifie par le simple argument que le monde a toujours besoin de connaissances géographiques.
Le point de vue de Chorley (1967) sur les possibles conséquences des subdivisions de la géographie et les forces centrifuges auxquelles elle s'expose en s'ouvrant aux nouvelles techniques, rappelle un peu le débat actuel sur la géomatique et la géographie. En effet, Chorley pensait à l'époque que cette ouverture scientifique sur d'autres disciplines pourrait ressouder la géographie physique et la géographie humaine, notamment à travers la cartographie à laquelle il attribuait une place centrale dans une géographie science de l'espace. En l'occurrence, nous retrouvons le même argument un quart de siècle plus tard

dans l'article d'Openshaw (1991) qui a eu un écho retentissant dans la communauté géographique. Openshaw pense que l'association de la géographie et des SIG peut rendre plus crédible cette science sociale « molle » qu'est la géographie par l'emprunt aux sciences « dures » dans lesquelles il classe les SIG tout en soulignant que la géographie se nourrit des deux. Dans le même article l'auteur fait part de la possibilité que les SIG contribuent à remplacer le processus de fission disciplinaire par une fusion : « Les SIG mettent avant tout l'accent sur la nature simplement holistique du modèle de données spatio-temporelles qu'est la géographie. » (Openshaw, 1991 ; in : Robic et Pumain, 2003). La publication d'Openshaw dont le titre original (A view on the GIS crisis in geography, or, using GIS to put Humpty-Dumpty back together again) perdrait beaucoup de sa force d'expression à la traduction, est l'un des premiers articles qui ont été à l'origine d'un vif débat sur le statut scientifique des SIG et leurs relations avec la géographie.

Les SIG : outil versus science

Nous avons déjà rappelé les différentes définitions des SIG et de la géomatique (cf. chapitre 1, § 1) conférant une amplitude scientifique plus ou moins large à ces notions.
En 1997, Wright et al. reprennent cette discussion en s'appuyant sur un débat électronique du forum GIS-L, tenu en 1993. Ce dernier, compte tenu du taux de connexion à Internet et des habitudes de travail des chercheurs il y a onze ans, a été très animé et témoigne, selon plusieurs auteurs (cf. aussi Schuurman, 2000), d'un réel besoin de la communauté scientifique de discuter, au-delà des aspects techniques et méthodologiques, du positionnement scientifique des SIG. Goodchild (1993, in Wright et al., 1997) se réjouit de ce qu'il appelle une tendance nouvelle des géographes, consistant à regarder le SIG non seulement comme un outil de recherche mais aussi comme un phénomène sur lequel on peut réfléchir et que l'on peut commenter. Wright et al. écrivent que l'analyse du débat *SIG – outil versus science* a été productif pour préciser ce que nous entendons par « faire du SIG en géographie ». Les auteurs résument les différents points de vue exprimés à ce sujet et que l'on peut classer dans trois rubriques :

- SIG comme outil : selon cette position, le SIG constitue une catégorie particulière de logiciels. L'outil, considéré comme neutre, son développement et sa disponibilité sont alors largement indépendants de son usage pour une application donnée – une position que les auteurs rejettent.
- SIG générateur d'outils (GIS toolmaking) : cette position place les SIG dans un contexte académique propre à augmenter les capacités des outils et faciliter leur usage. Au-delà de leur simple emploi, les « utilisateurs-générateurs d'outils » jouent un rôle actif dans la diffusion, l'enseignement et l'usage responsable des SIG. Wright et al. pensent que les géographes possèdent deux facultés exclusives en tant que générateur d'outils. La première est liée à leur connaissance de concepts géographiques qui se reflètent dans la structuration des bases de données SIG et leur traitement mais également dans leur faculté de placer ces concepts dans un cadre théorique, de choisir les méthodes d'analyse et les modèles adaptés. Le second avantage des géographes dans ce domaine est simplement leur habitude disciplinaire d'intégrer un large spectre de savoirs dans leur explication des processus complexes formant le *visage de la Terre*, pour reprendre une expression de Neef (1966).

- SIG comme science : cette acceptation des SIG insiste sur les relations entre outil et science, ce qui implique des recherches sur des problèmes de fond, qui existaient probablement avant même l'essor des SIG, mais dont la solution devient urgente en raison même de leur existence. Ainsi, les défendeurs de cette position placent les SIG dans une tradition d'émergence de nouvelles sciences comme, l'a fait, par exemple, l'informatique, dont les problèmes de recherche fondamentale étaient, auparavant, associés aux mathématiques. Dans ce contexte, les auteurs notent l'émergence de deux termes décrivant la dimension scientifique des SIG : *géomatique* et *science de l'information géographique* (notion plus courante, pour le moins à la fin des années 1990, dans les pays anglophones). Les deux termes soulignent littéralement leur fort degré de parenté avec la géographie mais évoquent aussi ce que nous avons décrit comme un « champ transdisciplinaire doté d'un effet synergique élevé » (cf. chapitre 1, § 1).

Les géographes et leur géomatique – un débat critique

Les origines de la géomatique sont essentiellement anglo-saxonnes. Aussi n'est-il pas surprenant que les premiers débats critiques sur la géomatique et sur ses relations avec la géographie aient eu lieu outre-Atlantique.
Cunningham (2002), lui-même géographe, évoque une certaine réticence des géographes à ouvrir ce débat. Réticence qu'il explique par une certaine ignorance et inquiétude en la matière quant à l'introduction d'une géographie informatique. Selon lui, certains géographes se seraient, dans un premier temps, retranchés derrière une position déclarant la technologie neutre, afin de masquer leurs sentiments technophobes avant « d'ouvrir le feu » sur les géomaticiens de leur discipline.
Harris et Weiner (1996), résumant l'initiative 19 du NCGIA (GIS and Society: The Social Implications of How People, Space, and Environment are represented in GIS), font état des premières analyses critiques à l'égard des SIG, au début des années 1990 (le terme géomatique était encore peu usuel à l'époque) : Taylor (1990, Openshaw (1991), Smith (1992), Pickles (1993, 1995), Lake (1993), Sui (1994), Miller (1995), Speppard (1995). Leur ouvrage, comme l'article de Schuurman (2000) proposent une bibliographie exhaustive à ce sujet. Cette dernière reconnaît dans ce débat (en 2000) une certaine chronologie et scinde la dernière décennie en trois phases, même si les premières contributions ont été publiées à la fin des années 1980 (entre autres : Abler, 1988) :

- 1990 – 1994 : une opposition frontale des opinions scindant souvent la communauté scientifique et polarisant le débat entre défenseurs inconditionnels et adversaires farouches.
- 1995-1997 : face aux critiques, devenues plus nombreuses, un débat s'instaure, lié notamment à deux événements : le séminaire de Friday Harbor, organisé en 1995 par Tom Poiker, un chercheur reconnu pour son engagement historique en géomatique. La rencontre est à l'origine de l'initiative 19 du NCGIA susmentionnée. De nombreux aspects sont évoqués, allant d'un manque de profondeur théorique en géomatique en passant par un déficit de responsabilité sociale jusqu'à des critiques inspirées d'idéologies politiques (attitude impérialiste des SIGistes, ….).

- A partir de fin 1997 : l'auteur note un débat devenu plus nuancé, pourtant toujours handicapé par l'absence d'un vocabulaire en commun des différentes disciplines impliquées, portant notamment sur les effets sociaux induits par la géomatique.

Wright et al. (1997) voient dans la nature numérique de l'information une possible limitation de la géomatique en tant que science à fort caractère géographique. Ainsi posent-ils la question : y a-t-il des concepts géographiques que l'on ne pourra jamais représenter et traiter par SIG ?

2.2. Des fonctionnalités géomatiques en géographie

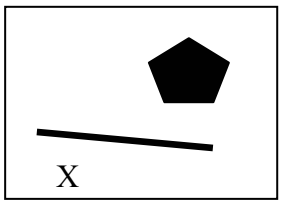
A quoi peut répondre un SIG ?

Les activités humaines se déploient, depuis toujours, dans l'espace. La connaissance de ses éléments, de ses propriétés et de ses potentialités s'avère par conséquent capitale. Les tentatives de maîtrise de l'espace commencent par son inventaire (cartographie) et remontent à l'aube de l'humanité.
Ce qui est spécifique aux SIG, par rapport aux autres systèmes d'information, est la *géographie* au sens très restreint de localisation des informations traitées dans un référentiel spatial. Cette géographie-là fait partie de notre vie quotidienne. Nombre de décisions sont influencées ou dictées par elle : lieu de vacances (distance, moyens de transport, attraits du site, …), lieu de résidence (distance au lieu de travail, infrastructures, prix, …), implantation d'une grande surface (désenclavement, centralité, potentiel de consommateurs, …), tracé d'une ligne de TGV, …
La maîtrise de l'information géographique semble encore plus capitale dans un monde que nous savons, depuis les années 1970, limité et qu'il faut connaître et analyser pour mieux le gérer. L'information géographique décrit des éléments de la surface terrestre par leur position sur celle-ci, par leurs attributs, par les relations spatiales existant entre ces éléments et par leur caractère temporel (on reviendra sur la dimension temporelle dans la partie II).
L'utilité première d'un SIG est sa capacité de répondre à des questions d'ordre spatial. Nombre de ces questions se résument à deux types d'interrogation :

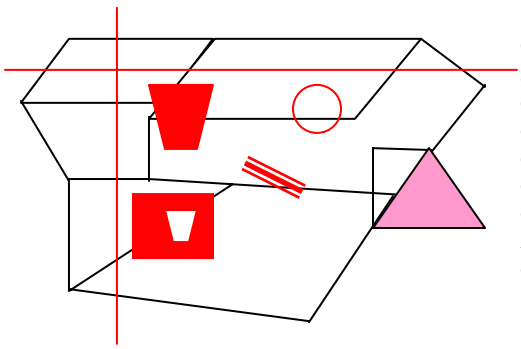
- Qu'est-ce qui se trouve à un endroit?
- Quelle est la position d'un objet?

Ces questions simples sont généralement liées à des conditions (cf. fig.9) basées sur :

- Un attribut : un intervalle de propriétés spécifiées (valeur, qualité ou combinaisons) – par exemple le type de forêt dans un secteur donné.
- La distance par rapport à un objet – par exemple l'identification des fragments boisés dans un rayon de 2 km autour des habitats protégés.
- L'inclusion – par exemple recensement des objets dans une zone à risques.



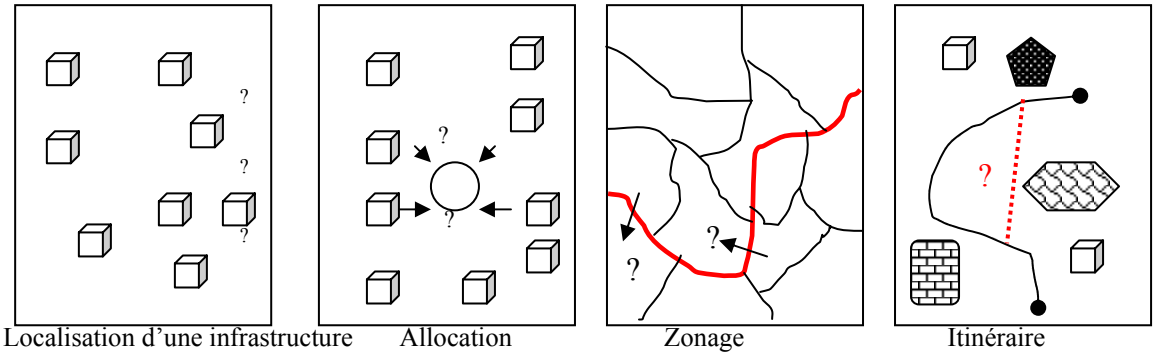
Qu'est-ce qu'il y a dans cette surface, sur cette ligne, à ce point ?



Qu'est-ce qu'il y a à ce point, dans cette surface, dans cette zone circulaire, dans ce tampon, dans ce trou, dans la zone non couverte ?

Fig. 9 : Exemples de requêtes spatiales élémentaires

Des questions plus complexes consistent à mesurer la distance entre deux objets, à compter les objets voisins d'un objet sélectionné, analyser le réseau que forment certains objets linéaires (routes, cours d'eau). En l'occurrence, nous dépassons la requête élémentaire pour *identifier des relations spatiales*. La fig. 10 illustre différents types de questionnement spatial faisant intervenir la topologie de l'espace.



Localisation d'une infrastructure Allocation Zonage Itinéraire

Fig. 10 : Exemples de requêtes faisant appel à la topologie spatiale

Rhind (1990) distingue six grandes catégories de questions auxquelles un SIG peut apporter une réponse:

- **Localisation** : en déplaçant le curseur sur l'écran, il est possible d'obtenir de l'information sur un lieu visé (nom du canton, population d'une ville, etc.). Il s'agit en l'occurrence d'une simple consultation qui ne nécessite que la mise en relation de la base cartographique avec la base attributaire.
- **Condition** : en utilisant les opérateurs d'évaluation on peut poser des questions assorties de conditions d'ordre spatial (< 2 km autour des secteurs à risque d'inondation élevé) et / ou attributaire (secteurs dans les enjeux patrimoniaux dépassent tel seuil).

- **Tendance** : il peut s'agir de tendances temporelles (les broussailles sont-elles aujourd'hui plus étendues qu'il y a dix ans ?) et / ou spatiales (les broussailles sont-elles plus étendues sur les pentes fortes qu'en plaine ?). L'analyse nécessite plusieurs bases de données géoréférencées.
- **Cheminement** : calcul de l'itinéraire le plus court, le plus rapide, le moins cher (accessibilité des parcelles cultivées en montagne).
- **Lois de distribution spatiale** : détection de concentrations, d'irrégularités de répartition, … (la répartition des broussailles est-elle indépendante d'une variable d'environnement comme l'exposition ?)
- **Modélisation** : simulation d'aménagements prévus (impact environnemental d'une route) ou de changements pressentis (dynamique de l'occupation du sol).

L'ensemble de ces six catégories de questionnements sera mis en œuvre pour la modélisation de l'occupation du sol (partie II).

Ces questions d'intérêt fondamental en de nombreux secteurs d'activité sont présentées dans un ordre progressif quant au niveau d'analyse exigé. Crain et MacDonald (1984, in : Gutiérrez Puebla et Gould, 1994) distinguent trois phases dans l'évolution des SIG : inventaire - analyse - gestion. Maguire (1991, in : Gutiérrez Puebla et Gould, 1994) met en relation cette progression des SIG avec le schéma de questions fondamentales de Rhind (1990). Selon lui, la plupart des SIG fonctionnels à la fin des années 1980 accomplissaient une tâche d'inventaire. L'auteur note quelques applications analytiques mais insiste sur le fait que peu de SIG sont utilisés sous conditions réelles dans des services de gestion. Depuis 1990, la part des SIG opérationnels a considérablement augmenté.

La première phase – l'inventaire - correspond aux grands programmes d'acquisition de données (inventaire forestier, réseau de communications, cadastre) tels ceux de l'IGN numérisant l'information analogique existante. Durant cette phase initiale, les SIG sont généralement utilisés pour consulter les bases acquises ou pour poser des questions d'ordre élémentaire (localisation et condition pour employer la typologie de Rhind).
Les SIG du second niveau s'attaquent à des questions plus complexes qui nécessitent de recourir à l'analyse simultanée de plusieurs plans d'information ainsi qu'à des algorithmes statistiques voire géostatistiques. Des applications typiques en sont, par exemple, la localisation optimale des réservoirs d'eau dans un plan d'aménagement forestier contre les incendies ou l'identification de zones représentatives pour des sondages pédologiques (cf. chapitre 3).

Les SIG ayant atteint la troisième phase sont insérés dans des circuits de gestion et d'aide à la décision: optimisation d'itinéraires, simulation de projets d'aménagement, maintenance, prévisions. L'analyse spatiale approfondie et la modélisation leur sont nécessaires (cheminement, distribution, modèle).

De par leur caractéristique commune, c'est-à-dire traiter des données localisées dans l'espace, les différents outils géomatiques, notamment les SIG (et leur équivalent dans les logiciels de traitement d'image), offrent une riche gamme d'applications à caractère profondément géographique, allant de l'analyse spatiale via les outils de l'étude multitemporelle à des algorithmes d'aide à la décision.

Fonctionnalités géomatiques

On peut rappeler ici brièvement les principaux types de fonctionnalités géomatiques mises en œuvre dans le domaine du traitement de données géoréférencées. Nombre d'entre elles seront illustrées au cours du chapitre suivant en prenant exemple sur nos propres recherches ou celles que nous avons encadrées dans le domaine de la géographie de l'environnement.

La formulation de l'analyse ainsi que les opérations possibles dépendent entre autres:

- du modèle de représentation (image/objet)
- de l'organisation des données (base relationnelle ou orientée objet)
- des propriétés sollicitées (géométriques, topologiques, attributaires)
- du niveau scalaire des données.

Si on se base sur une organisation des données par plans d'informations (mode le plus répandu), l'analyse peut explorer l'agencement spatial des objets ou des pixels au sein d'un seul plan (analyse horizontale) ou, au contraire, combiner les données issues de plusieurs plans (analyse verticale). Dans les deux cas, et s'agissant de l'approche conceptuelle objet, ces analyses sont mises en œuvre dans le cadre des bases de données attributaires par des langages de requête, reposant tous sur l'algèbre relationnelle.

Analyse horizontale

L'analyse horizontale s'effectue au sein d'un seul plan d'information. Nombreux sont les algorithmes imaginables pour évaluer l'entrelacement paramétrique dans l'espace et pour effectuer une analyse spatiale au sens propre du terme : est-ce que et de quelle manière l'espace lui-même intervient-il dans l'organisation du phénomène étudié ? Les fonctions utilisées se fondent pour l'essentiel sur les critères de proximité (distance, zones d'influences, …) et de relations fonctionnelles ou topologiques de l'espace issues du concept des graphes.
Les propriétés de la matrice (torique on non, gestion des bordures) ont une grande importance et sont définies selon les applications envisagées. Nous reviendrons sur ce point au cours de la partie II. La figure 11 donne un aperçu des opérations possibles en mode raster:

- Opération ponctuelle (a): changement de la valeur du pixel.
- Opération régionale (b): changement du compte numérique de plusieurs pixels connectés.
- Filtrage où le compte numérique du pixel central est défini par les comptes numériques des pixels environnants (c).
- Filtrage consistant à affecter le compte numérique du pixel central aux pixels du voisinage direct (d).
- Filtrage s'étendant sur les pixels du voisinage étendu (e, f).
- Diffusion ou flux dans des conditions anisotropes représentées sous forme de barrière (g) ou appliquées au relief (h).

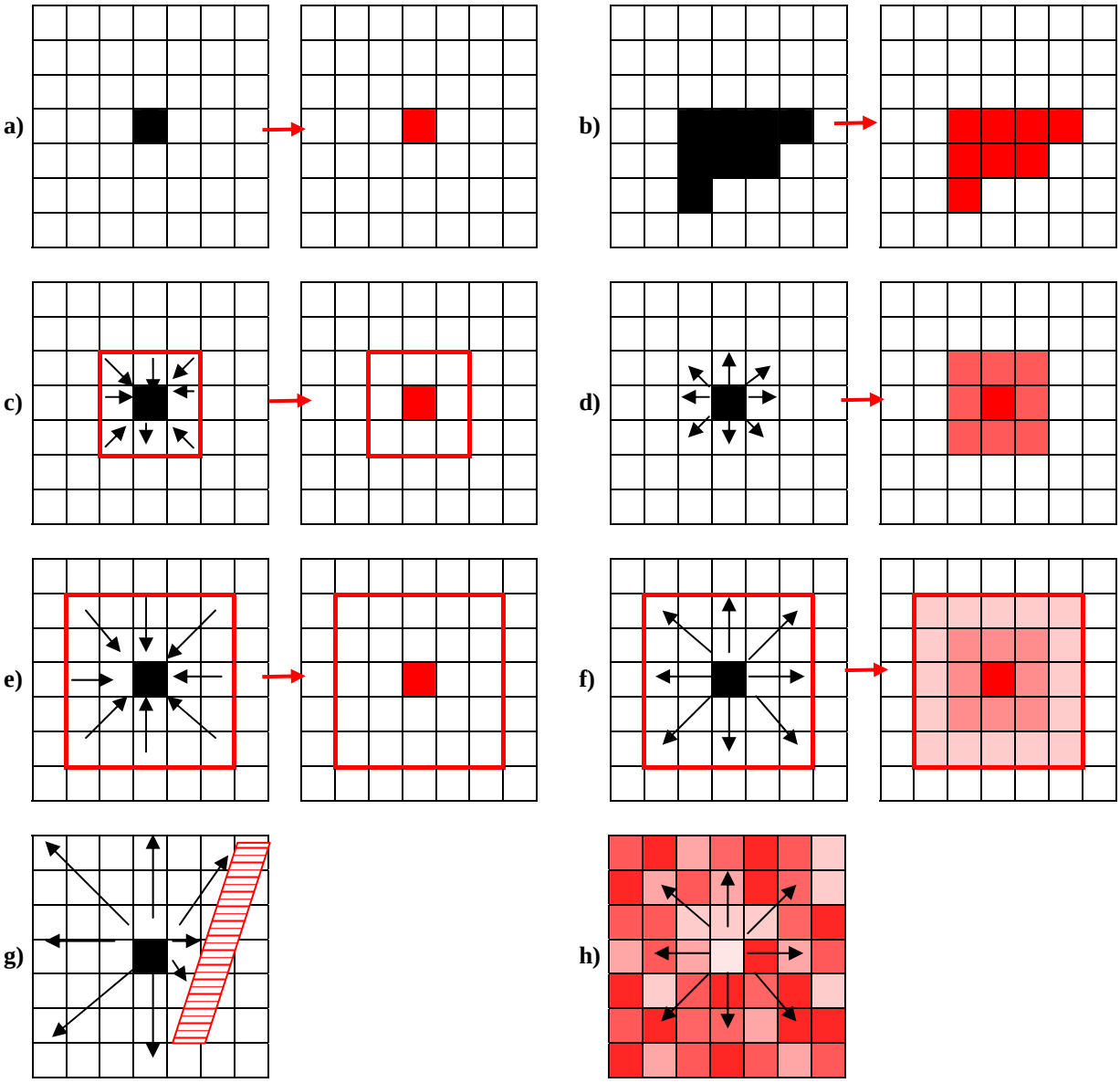


Fig. 11 : Exemples d'analyse horizontale

Les traitements de données raster faisant appel à la position et aux comptes numériques des pixels au sein d'un plan d'information couvrent un champ très vaste. Nombre d'auteurs, notamment Burrough (1986) et Gutiérrez Puebla et Gould (1994), les classent par l'étendue des pixels impliqués dans le traitement (cf. fig. 11) :

- Opérations au niveau du pixel isolé: traitements de base (recodage, binarisation, …).
- Opérations mettant en relation un pixel avec les huit pixels environnants (analyse de voisinage direct).
- Opérations mettant en relation un pixel avec les pixels de l'entourage direct et indirect (analyse de voisinage étendu).
- Opérations s'effectuant sur des plages de pixels contigus ayant le même compte numérique (analyse zonale).

L'analyse horizontale joue un rôle important notamment pour calculer des cartes dérivées d'un MNT (modèle numérique de terrain) : pente, exposition, intervisibilité, détermination de bassins versants, de talwegs, de crêtes, cartes d'ensoleillement, cartes de distance, zones tampon, polygones de Thiessen, ruissellement surfacique (cf. fig. 12).

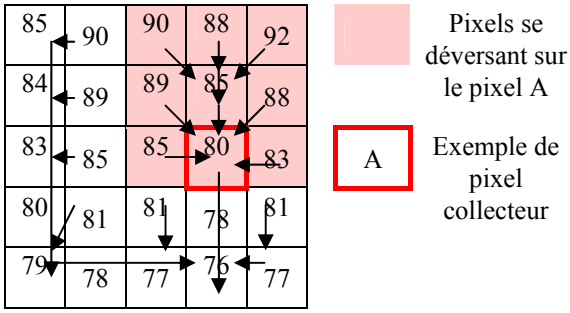


Fig. 12 : Principe d'une carte de ruissellement surfacique

Analyse d'entrelacement paramétrique

Il s'agit d'une analyse de voisinage pendant laquelle l'algorithme renseigne une matrice à double entrée (croisement des comptes numériques avec eux-mêmes) enregistrant la nature des relations de chaque pixel avec ses voisins. L'analyse de la matrice de voisinage donne des informations sur la distribution spatiale des valeurs: agglomérée (fort pourcentage d'autocorrélation), dispersée (relation privilégiée avec des comptes numériques différents), … Selon la taille du filtre et la pondération de la distance, les structures spatiales (pattern) décelées diffèrent. Ce type d'analyse se prête particulièrement aux cartes complexes, comme par exemple une carte pédologique ou une carte de la végétation. L'analyse d'entrelacement paramétrique a l'avantage d'opérer au niveau nominal, se prêtant ainsi à tous les types de données (cf. chapitre 3, § 2).

Pseudo-objets

On définit communément une *zone*, en mode raster, comme une plage de plusieurs pixels contigus ayant le même compte numérique. Leur reconnaissance en mode raster imite quelque peu la démarche objet qui se base sur des objets identifiés et délimités. Nous qualifions ces zones de *pseudo-objets* dans la mesure où elles représentent des entités spatiales sans pour autant recourir à la logique topologique du modèle vectoriel. L'importance de cette approche réside dans le couplage des modes image et objet (Paegelow, 2001), dont très peu de logiciels tirent profit.
La figure 13 illustre le principe de la reconnaissance de pseudo-objets tandis que la figure 14 l'applique à la transformation d'une carte d'occupation du sol en carte d'identifiants de pseudo-objets pouvant être couplés à une base de données relationnelle.

Carte d'occupation du sol à trois catégories avec double occurrence des catégories 1 et 2.

1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
1	3	3	3	3	2	2	1	1	1
2	2	3	3	3	3	1	1	1	1
2	2	3	3	3	3	1	1	1	1
2	2	3	3	3	3	1	1	1	1
2	2	2	3	3	3	3	1	1	1

Carte des pseudo-objets : Les comptes numériques servent d'identificateurs.

1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
1	1	1	1	2	2	2	2	4	4
1	3	3	3	3	2	2	4	4	4
5	5	3	3	3	3	4	4	4	4
5	5	3	3	3	3	4	4	4	4
5	5	3	3	3	3	4	4	4	4
5	5	5	3	3	3	3	4	4	4

Fig. 13 : Principe de la détection de pseudo-objets en mode image

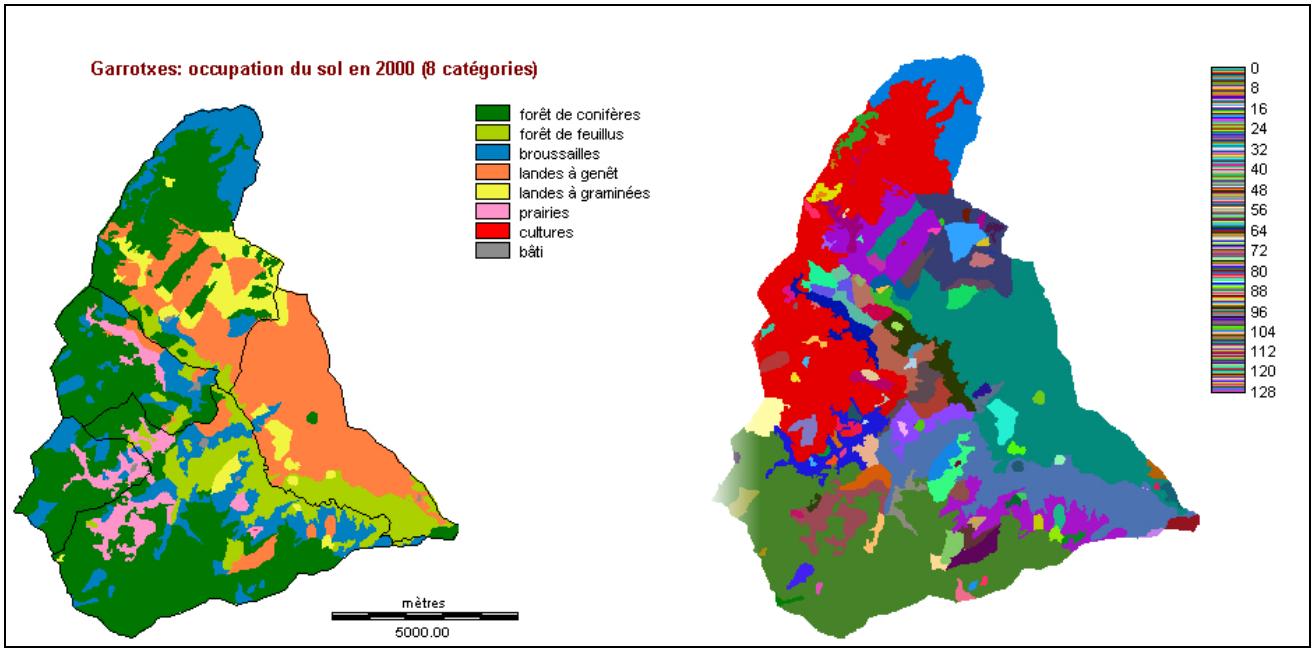


Fig. 14 : Passage d'une carte d'occupation du sol (Garrotxes, Pyrénées Orientales) à une carte de pseudo-objets

Analyse verticale

La fonction la plus caractéristique des SIG est sans doute leur capacité de croiser des plans d'information (analyse verticale). Ce croisement se base sur l'emploi d'opérateurs logiques appelés aussi opérateurs booléens. Comme les autres types d'opérateurs (arithmétiques, conditionnels), ils peuvent être appliqués aussi bien aux données attributaires qu'aux données spatiales. On distingue les opérateurs booléens suivants: ET, OU, XOR (OU exclusif), NON. La mise en oeuvre de ces opérateurs peut être classiquement illustrée sous forme de diagrammes de Venn (fig. 15). Appliquée à des données spatialisées, on parle d'intersection, d'union, de différence d'identité ou d'exclusivité (fig. 16).

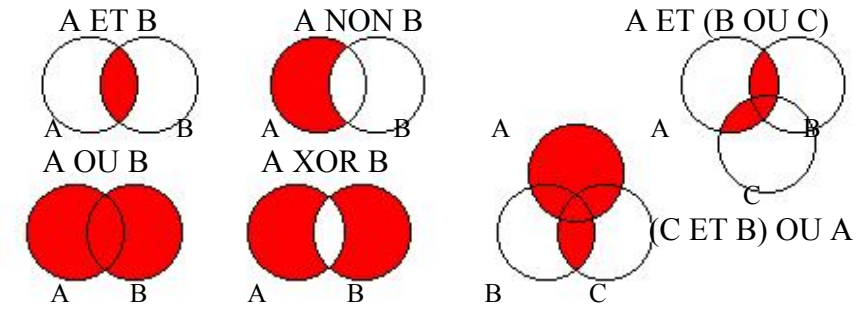


Fig. 15 : Illustration graphique des opérateurs logiques par diagrammes de Venn

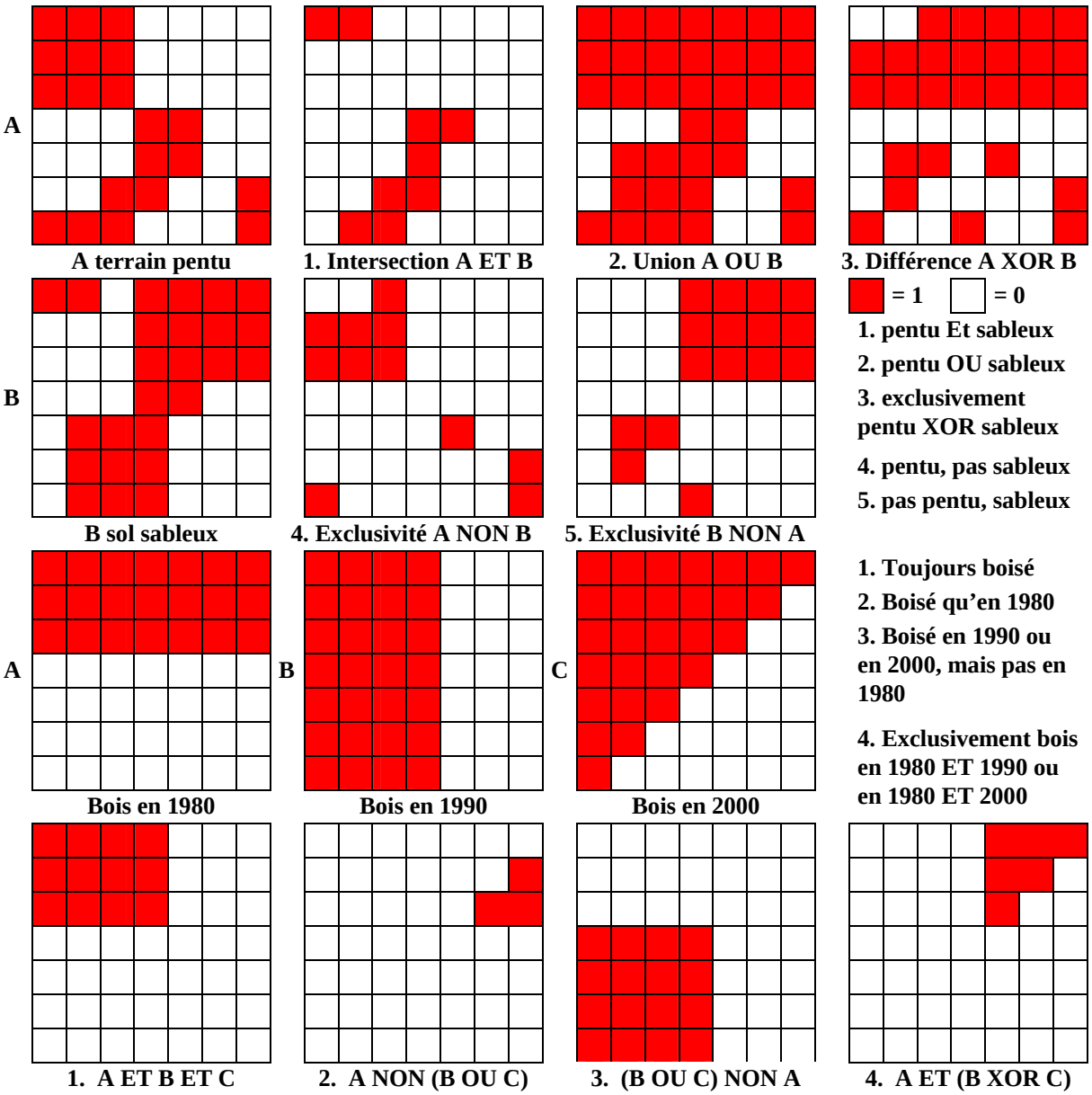


Fig. 16 : Exemples d'application raster de l'algèbre logique : croisements entre plans thématiques (en haut) et croisements entre plans temporels (en bas)

Les opérateurs booléens deviennent un outil incontournable en mode image. La discrétisation uniforme de l'espace permet une variété quasiment infinie d'analyses basées sur les opérateurs logiques qui peuvent être combinés avec les opérateurs arithmétiques et conditionnels pour formuler des requêtes complexes (fig. 17).

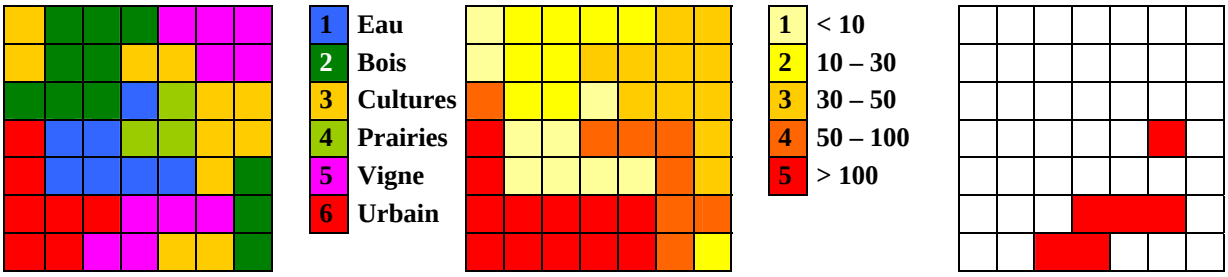


Fig. 17 : Exemple de combinaison entre opérateurs logiques et d'évaluation

Afin d'accélérer les traitements (et de minimiser l'espace occupé sur les supports de masse), la compression des données raster par la méthode des quadrants ne donne pas seulement un taux de compression élevé mais permet aussi un accès hiérarchique aux données (fig. 18). Ainsi les opérations ont lieu au niveau des nœuds de l'arborescence.

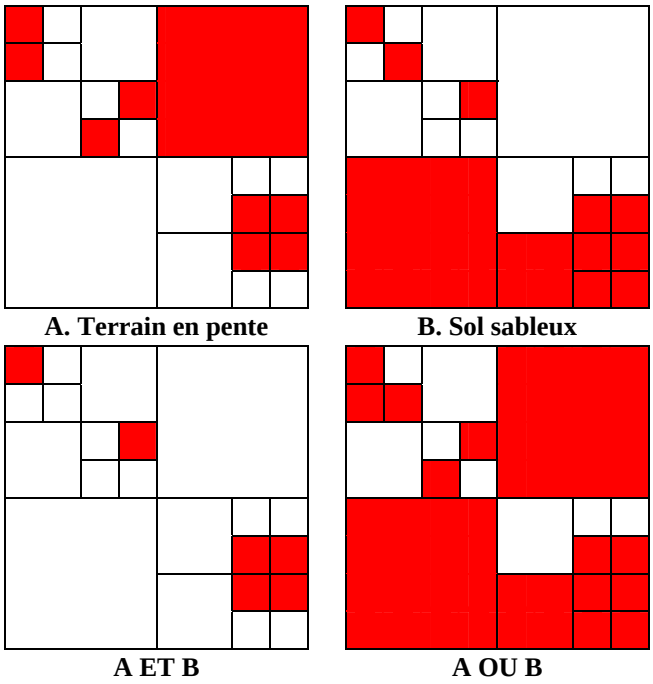
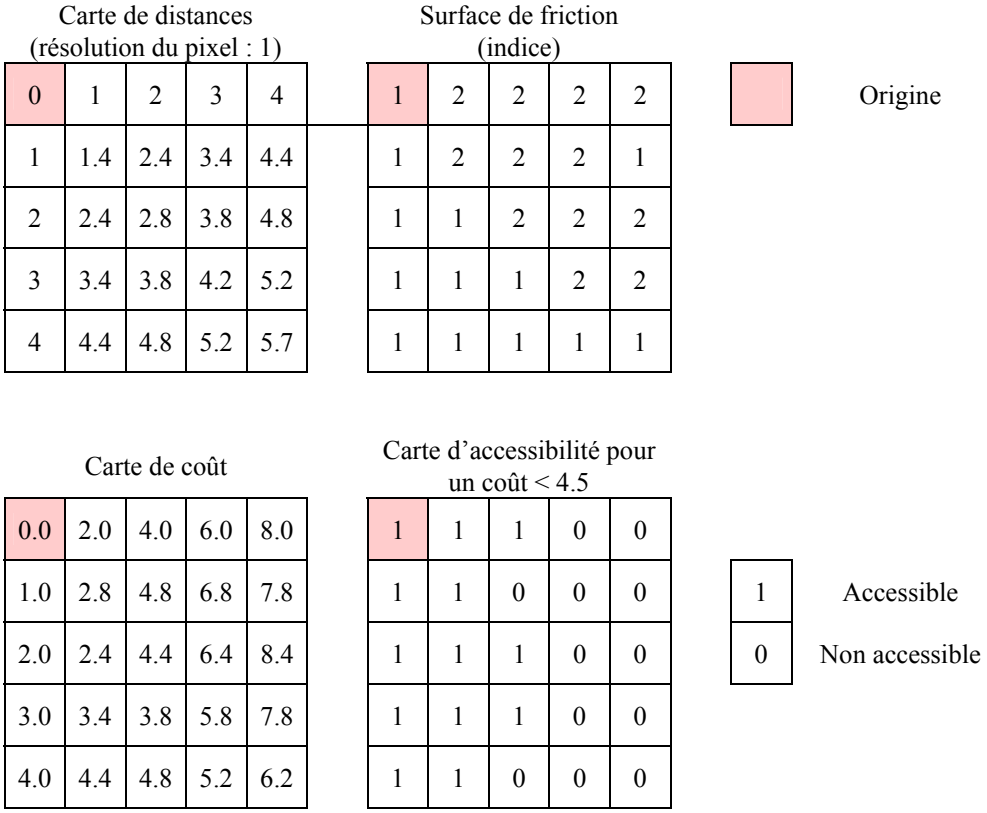


Fig. 18 : Intersection et union de plans raster compressés par la méthode de quadrants

L'emploi des opérateurs logiques en mode vectoriel est plus lourd puisque l'objet lui-même peut être mis en cause: disparition, changement de forme et de taille, apparition de nouveaux objets. Ainsi, une réorganisation des tables positionnelles et topologiques est aussi nécessaire qu'une mise à jour de la table attributaire. Plusieurs techniques (indexation par rectangles minimum, découpage en bandes parallèles, …) permettent d'accélérer le croisement entre plans d'information en mode objet.

Surface de friction

Une analyse de proximité mesure la distance euclidienne à partir d'une origine : point(s), ligne(s) surface(s) / pixel(s). La seule prise en compte de la distance est souvent insuffisante dans la mesure où l'espace géographique n'est pas homogène. On parle de la *rugosité de l'espace* si celui-ci s'avère être anisotrope.
La figure 19 illustre le principe de calcul d'un plan de friction tandis que la figure 20 en donne un exemple concret issu de nos recherches portant sur l'analyse des dynamiques d'occupation du sol en milieu montagnard.



0	1	2	3	4
1	1.4	2.4	3.4	4.4
2	2.4	2.8	3.8	4.8
3	3.4	3.8	4.2	5.2
4	4.4	4.8	5.2	5.7

1	2	2	2	2
1	2	2	2	1
1	1	2	2	2
1	1	1	2	2
1	1	1	1	1

0.0	2.0	4.0	6.0	8.0
1.0	2.8	4.8	6.8	7.8
2.0	2.4	4.4	6.4	8.4
3.0	3.4	3.8	5.8	7.8
4.0	4.4	4.8	5.2	6.2

1	1	1	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0
1	1	1	0	0
1	1	0	0	0

Fig. 19 : Principe d'une surface de friction pour établir une carte d'accessibilité.

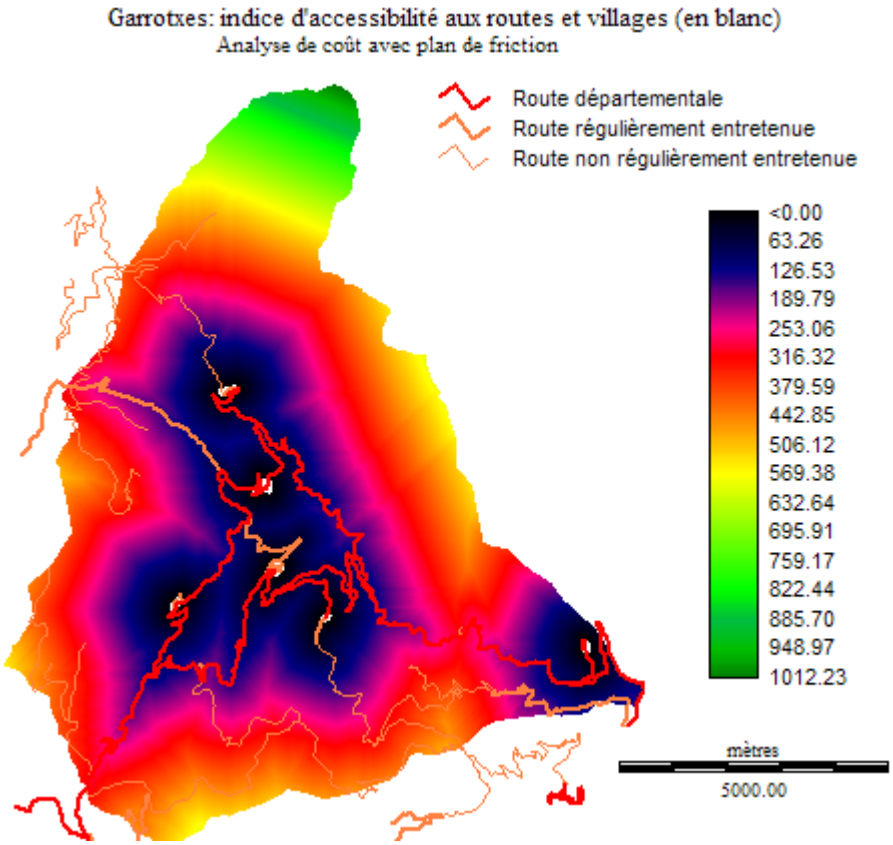


Fig. 20 : Carte d'accessibilité aux routes (pondérées) et aux villages dans les Garrotxes (Pyrénées Orientales)

Algèbre relationnelle et langage de requête

Algèbre relationnelle

L'interrogation des bases attributaires, outil classique des SGBD, est dans le domaine des SIG généralement réservée à l'approche conceptuelle objet. L'algèbre relationnelle est l'instrument de requête des bases relationnelles. Les principes de l'algèbre relationnelle sont décrits dès la première génération de manuels SIG, entre autres par Rouet (1991), Laurini et Thompson (1992) et Laurini et Milleret-Raffort (1993). On distingue huit opérations relationnelles élémentaires que l'on classe selon la nature de la relation établie. La présentation suivante est inspirée de Paegelow (2001).

- Opérations sur une seule table (ou relation)

Projection : extraction d'une ou de plusieurs colonnes (attributs) d'une base.
Restriction : extraction d'une partie des objets d'une base de données.
Division : restriction à plusieurs conditions agissant sur le même attribut.

- Opérations sur deux tables de même schéma

Intersection : produit un sous-ensemble (objets et attributs) de deux tables par une requête portant sur deux attributs, chacun dans une table différente, chaînés par l'opérateur logique ET.
Union : rassemble en une seule table les objets de deux tables en éliminant les occurrences doubles par l'opérateur logique OU.
Différence : permet d'obtenir les objets d'une table qui ne se trouvent pas dans une autre table de même schéma par l'opérateur logique NON.

- Opérations sur des tables de structure différente

Produit cartésien : forme la combinaison de tous les objets d'une table avec toutes les objets d'une autre. Le nombre d'objets obtenu est le produit de ceux des deux relations, le nombre d'attributs étant la somme du nombre d'attributs de chaque table.
Jointure : produit une nouvelle table dont le nombre d'attributs est égal à la somme des attributs des deux tables moins le pivot de la jointure (identificateur) qui ne nécessite pas de répétition. Le nombre d'objets résultant d'une jointure est celui des objets présents dans les deux tables.

Les opérations relationnelles sont mises en oeuvre par un langage de requête relationnelle.

Langage de requête relationnelle

Un langage de requête est un ensemble d'outils formalisé afin d'interroger la base de données, de la filtrer ou trier ou encore pour calculer les valeurs d'un champ.
Dans le domaine des langages requête le langage SQL (structured query langage – langage de requête structurée), conçu par IBM, est la référence historique. Tous les langages de requête, plus ou moins intuitifs, proposés dans les logiciels SIG actuels s'inspirent du SQL. La figure 21 illustre l'algèbre relationnelle mise en œuvre par une interface de requête graphique.

L'interrogation de la base attributaire avec l'objectif de visualiser cartographiquement les entités spatiales correspondant aux critères choisis permet des requêtes plus complexes. Ces requêtes font appel aux opérateurs logiques, conditionnels et arithmétiques. La figure 21 montre un exemple simple issu des recherches sur la dynamique de l'occupation du sol en milieu montagnard (Garrotxes, Pyrénées Orientales). On interroge la base attributaire afin de visualiser les objets correspondant à la catégorie d'occupation du sol n° 5 (landes à graminées) dont la surface est supérieure ou égale à 10 ha.

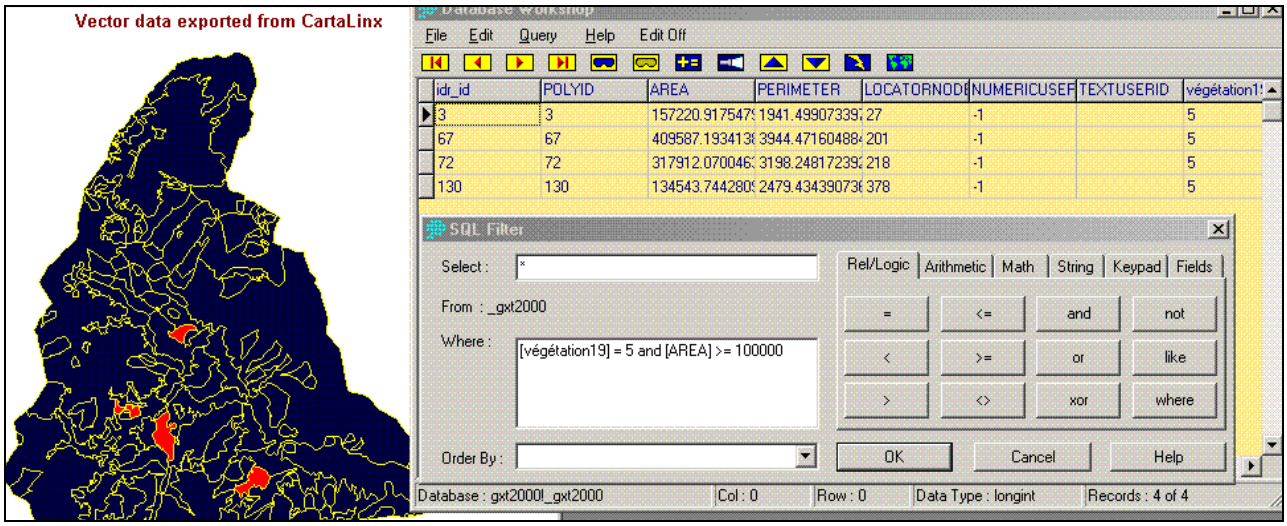


Fig. 21 : Requête attributaire basée sur deux opérateurs d'évaluation chaînés par un opérateur logique (intersection assortie de deux restrictions)

Chapitre 3. Parcours géomatique d'un géographe de l'environnement

3.1. Apprentissages et questionnements

Mon premier contact avec la géomatique remonte au début des années 1980. Etudiant de géographie en quatrième année à l'université de Kiel, l'équipe du professeur Fränzle m'offrait la possibilité de participer à un programme de recherches visant à identifier des zones représentatives à l'échelle de la RFA, afin d'y mener des études géosystémiques permettant de quantifier, dans la mesure du possible, flux et échanges énergétiques, matériels et informels, entre les composantes du géosystème. A cette époque, la branche de la géographie physique allemande, que l'on qualifie aujourd'hui de géographie environnementale, était largement inspirée de l'écologie américaine, dont Odum était un des représentants les plus illustres (Odum, 1971), mais également de la géographie russe (Sotchava, 1967 in Frolova, 2000 ; Rougerie et Beroutchachvili, 1991). La représentativité recherchée concernait les données disponibles à petite échelle et couvrant l'étendue entière du pays : constitution géologique et pédologique, végétation potentielle, altitude, … (Fränzle et al, 1987). Ma contribution, modeste, consistait à numériser ces cartes. En l'absence de scanner ou de table à digitaliser, la numérisation se faisait à l'aide d'une grille posée sur la carte papier. A l'aide de ce maillage, l'opérateur devait enregistrer la modalité dominante du pixel représentée par un code. Ce code était saisi par appui d'une lettre du clavier. Outre le fait que cette technique de rasterisation manuelle s'avérait très coûteuse en temps, elle relevait d'un procédé linéaire où chaque erreur de saisie nécessitait, après vérification des codes saisis sur un écran monochrome à affichage en mode texte uniquement, l'interruption du programme de saisie spécialement écrit à ces fins. Ce premier contact avec un ordinateur était riche d'enseignements : ne connaissant ni le fonctionnement d'un ordinateur, ni le système d'exploitation (MS-DOS), toute mon attention était focalisée sur la maîtrise technique minimale de l'outil (apprentissage de commandes DOS et des commandes basiques du programme de saisie) à une époque où l'informatique s'adressait aux seuls initiés et où son enseignement portait exclusivement sur le code machine binaire ou hexadécimal. Ressentant l'informatique comme un savoir opaque et incompréhensible, ce manque de maîtrise de l'outil occultait toute question critique sur la signification des opérations que j'exécutais :

- Les données saisies étaient-elles significatives par rapport à l'objet de l'étude ? Etaient-elle appropriées et pouvaient-elles expliquer une part important de la variabilité spatiale du phénomène étudié ?
- Les données saisies étaient-elles fiables ? Sachant que les données numérisées étaient cartographiées au millionième, l'épaisseur du trait séparant deux formations sur la carte couvrait entre 500 et 1 000 m sur le terrain. A cela s'ajoutent les problèmes bien connus de qualité : transcription manuelle, généralisation, sûreté du trait et qualité de l'information de base.
- Le mode de numérisation (enregistrement de la modalité dominante) était-il approprié ? Dans quelle mesure condamnait-il des formations ayant des surfaces de petite taille et dispersées dans l'espace ? Avec quelles conséquences pour le résultat ?
- Comment quantifier le degré d'erreur liée à la numérisation manuelle décrite et qui était génératrice d'erreurs multiples ?

Depuis les premières années d'études supérieures, j'ai porté un intérêt particulier aux méthodes et techniques qui fondent une démarche scientifique visant la quantification des phénomènes étudiés et – à défaut d'objectivité – l'intersubjectivité assurée par une démarche transparente et documentée, de manière à pouvoir réitérer l'analyse. C'est moins par méfiance envers le regard de spécialiste jugeant tel phénomène responsable de tel processus ou tirant le trait à tel endroit plutôt qu'ailleurs, que par souci de satisfaire à la reproductibilité et la significativité d'un résultat, que j'ai été attiré par la perspective d'un traitement prometteur et novateur.
La pierre angulaire d'une démarche scientifique – la reproductibilité des résultats – ne va pas sans une rigueur scientifique, qui implique de mettre *cartes sur table*. Trop de résultats sont présentés sans fondement méthodologique explicite, à l'image des cartes choroplèthes obtenues par trait d'artiste à partir de trop rares mesures ponctuelles (un regard sur la partie océanique de cartes climatiques de n'importe quel atlas scolaire en circulation il y a encore vingt ans suffit !). En ce sens, la démarche du projet évoqué ci-dessus et visant à identifier des zones représentatives de la diversité géographique afin d'y mener des études géosystémiques, était, dans le contexte de l'époque, exemplaire. Les hypothèses de départ étaient explicitées, les données utilisées connues et la méthode de traitement des données expliquée au point que le résultat – contestable et critiquable – devenait reproductible grâce à une démarche transparente. En l'occurrence, il s'agit d'une démarche scientifique ordinaire, sans préjuger pour autant de la qualité des résultats. En effet, il n'est nullement exclu qu'un bon géographe aurait pu désigner une poignée d'espaces représentatifs de la diversité physico-géographique du territoire avec plus de discernement ou, plus simplement, avec une importante économie de temps et de moyens, comparée à la méthodologie lourde du projet. Ce raisonnement est d'autant plus tentant que, malgré la rigueur de la démarche suivie, il manquait nombre d'informations utiles (couverture incomplète, source contestée, …), ce qui appauvrissait ainsi, à la base du traitement, l'éventail des données disponibles. Quiconque ayant utilisé un SIG dans les années 1980 et au début des années 1990 sait apprécier la valeur de la disponibilité des données. En réaction, cette « faim de données » a pu d'ailleurs engendrer un réflexe consistant à inclure toute donnée dans un projet SIG, pourvu qu'elle soit disponible et sans égard à sa pertinence. Cet aveuglement technique est, à mon sens, responsable de nombre d'échecs patents.

Un second exemple personnel permet d'illustrer le clivage entre ambition thématique et immaturité géomatique au milieu des années 1980 : c'est le cas de mon mémoire de maîtrise (Paegelow, 1987) dont l'objectif prioritaire était la réalisation d'une cartographie de l'état physionomique des estives d'Archilondo (Pyrénées-Atlantiques) au cours de l'été 1986, afin de comparer ces données de terrain à l'une des premières images de SPOT 1, lancé en février de cette même année. Bien que la cartographie terrain ait été réalisée afin de la rendre comparable à un document télédétecté (taux de couverture, stratigraphie, couleur, …), le croisement visuel n'était pas aisé. Outre les problèmes de mise à disposition des données (tardives et uniquement consultables au CNES), l'établissement de relations entre les deux documents était limité à la fois par des facteurs matériels et inhérents à la source d'acquisition :

- La comparaison était purement visuelle : je juxtaposais alors une cartographie terrain au 1 : 5 000 couvrant quasiment un mètre carré à un affichage sur écran où la zone d'étude ne formait guère plus que quelques cm².
- Les outils d'affichage (zoom, navigation) des canaux SPOT étaient rudimentaires.

- N'ayant jamais travaillé avec des images de satellite d'observation de la terre à haute résolution, j'avais surestimé la résolution d'une image SPOT et sous-estimé l'impact du relief sur la qualité de l'image.

Autrement dit, avec les moyens techniques disponibles à cette date – et mon savoir-faire géomatique quasi inexistant – il était irréaliste de mener à bien cette tâche.

Tout au long des pages qui suivent, je me suis efforcé de retracer ma trajectoire d'enseignant-chercheur à l'interface géomatique et géographie de l'environnement.
J'ai choisi de rendre compte de cet itinéraire en l'exprimant selon quatre séquences, qui correspondent à autant de jalons chronologiques que de pôles d'intérêt, associés à des phases de tâtonnement, de maturation scientifique et de productions :

- Autour de mes recherches doctorales et de ses prolongements, qui ont véritablement marqué mon entrée en géomatique environnementale.
- Ma brève expérience d'entrepreneur et de concepteur de SIG : échec commercial mais formation informatique en profondeur …
- Mon parcours de maître de conférences au Département de Géographie et Aménagement de l'UTM (Université de Toulouse – Le Mirail) et au laboratoire GEODE, où, à travers recherches propres et recherches encadrées, a peu à peu mûri mon approche géomatique.
- Enfin, comme enseignant-chercheur, la construction progressive d'une pédagogie de la géomatique dans les cursus géographiques.

3.2. Autour d'Auradé : l'entrée en géomatique environnementale

De la réflexion à l'action

Mes recherches doctorales (1987-1991) s'inscrivaient dans une problématique environnementale : celle de la pollution diffuse d'origine agricole par les nitrates en contexte d'agriculture intensive. La finalité était double :

- D'une part, il était d'abord question d'une géographie de l'environnement appliquée : répondre à une demande sociale face à un problème de pollution diffuse d'origine agricole des eaux de surface par les nitrates dans une région de céréaliculture intensive. Ces recherches appliquées étaient coordonnées à celles d'agronomes, travaillant sur le même site et dont les solutions visaient l'optimisation de la conduite des cultures, tandis que les mesures que nous proposions pouvaient être qualifiées de *passives*, par leur seule action sur le milieu et l'aménagement agricole de l'espace.
- A cette recherche appliquée était liée une question de recherche plus fondamentale : comment modéliser le sol en pays molassique. En effet, le cycle de l'azote est largement connu dans un agrosystème équipé (bassin versant expérimental) permettant de quantifier les entrées (conduite des cultures) et les sorties (rendements, gestion des résidus de récolte et surtout la concentration en nitrates des eaux de surface et des nappes sub-épidermiques). Le maillon inconnu

> dans cette chaîne est le sol, qui constitue une véritable boîte noire. Cependant, les terroirs molassiques sont sujets à une pédogenèse assez chaotique à grande échelle comme le soulignait déjà jadis Cavaillé (1958) qui caractérisait la molasse comme « une formation très monotone dans l'ensemble mais très variée dans le détail ». Il s'agissait alors de pouvoir estimer la variabilité spatiale de certains paramètres pédologiques influençant le cycle de l'azote (granulométrie, pH, taux de calcaire, profondeur, …) et la concentration nitrique elle-même. En termes plus généraux, cette question s'inscrit dans le cadre du problème de l'échantillonnage ou, autrement formulé, la quête de zones représentatives d'un territoire donné.

Ces recherches doctorales s'inscrivaient dans la crise de l'agriculture européenne des années 1980 – crise multiforme, à la fois économique (stagnation des débouchés sur le marché mondial), institutionnelle (remise en cause de la politique agricole commune) et sociale (fermeture de nombreuses exploitations). Crise environnementale, enfin, dans la mesure où l'agriculture intensive allait de pair avec une grave détérioration des milieux naturels et des ressources. Une des conséquences les plus inquiétantes de cette forme de production agricole industrialisée était la rapide dégradation de la qualité des eaux directement liée à une augmentation importante de la fertilisation azotée. La consommation d'engrais azotés minéraux avait été multipliée par quatre ou cinq depuis les années 1960, aboutissant à des épandages de l'ordre de 200 unités de N/ha/an, dont une part importante est transférée sous forme de nitrates vers les eaux souterraines et de surface. Leur concentration en nitrates génère une pollution menaçant directement la santé humaine avec la possibilité de transformation en nitrite pouvant provoquer la méthémoglobinémie chez le nourrisson et certains effets cancérigènes. Vers la fin des années 1980, la limite de potabilité de 50 mg de nitrate par litre, instaurée en 1980 (Commission des Communautés Européennes, 1988) a été largement dépassée dans le Sud-Ouest de la France (entre autres : Salessy, 1987). Cette pollution déclenchait alors un conflit d'usage pour une ressource naturelle devenant de plus en plus limitée.

Le cycle de l'azote étant relativement simple (comparé notamment à la complexité et la diversité des pesticides), au début des années 1980 furent lancées nombre de recherches sur les mécanismes de transfert des nitrates du système sol-cultures vers les nappes et cours d'eau. Ces recherches prenaient des voies différentes : en laboratoire, en case lysimétrique ou en bassins versants. Ceux-ci offrent de multiples avantages : possibilité de compartimentage hydrologique permettant un suivi des solutés dans le sol et de bilans de transfert, déroulement des expériences en grandeur nature dans un milieu par définition complexe garantissant la praticabilité des résultats et leur transposition opérationnelle. D'autre part, les recherches en bassin versant se déroulent sous des contraintes économiques et agronomiques réelles, ce qui définit un critère de premier choix concernant la crédibilité des mesures visant la diminution de la pollution nitrique.

Nos recherches se sont déroulées en terrefort molassique, dans le bassin versant d'Auradé situé dans le Gers, à la limite haut-garonnaise marquée par les hautes terrasses les plus anciennes de la Garonne. Une des particularités du terrefort réside dans leur très grande variabilité à grande échelle, liée aux conditions anarchiques et changeantes de la mise en place molassique. L'autre paramètre majeur est formé par la relative imperméabilité de ce même substrat molassique, ce qui explique la focalisation de nos recherches sur les eaux de surface.

Ce site est représentatif des terreforts molassiques du Sud-Ouest et de l'agriculture intensive (d'Ussel, 1988), tandis que le deuxième ensemble naturel prédominant dans cette région – les grandes plaines alluviales – était étudié par l'INRA (cf. entre autres Decau et al, 1987).

Pour répondre au volet appliqué, les recherches se devaient d'aborder la boite noire bassin versant – situé entre un pool N entrant contrôlé et un flux N sortant mesuré aux exutoires - par une identification et caractérisation des principales structures (physico-géographiques, paysagères, agronomiques) du bassin versant et la sélection de celles s'avérant les plus favorables à la lutte contre la pollution par les nitrates. Ce travail s'accompagnait d'une série d'expérimentations in situ (essentiellement par emploi de bougies poreuses), afin de quantifier l'impact de certaines structures paysagères sur la dynamique de l'azote nitrique. S'appuyant sur ces résultats, on a pu proposer un ensemble de mesures destinées à réduire considérablement la concentration des cours d'eau en NO_3-, sans remettre en cause pour autant la conduite des cultures et la compétitivité des exploitations agricoles.
Parmi les informations à acquérir, les données pédologiques posaient un problème majeur, puisque le sol, situé entre les cultures en amont et les cours d'eaux en aval, joue un rôle-clé dans la dynamique de l'azote minéral et le transfert des nitrates et appelle de fait une étude détaillée. Comme toute étude pédologique à grande échelle, la nôtre représentait une entreprise lourde en moyens et coûteuse en temps et analyses. La variabilité du terrefort molassique, déjà démontrée au cours du DEA (Paegelow, 1988) par des sondages selon la méthode des transects toposéquentiels, a rendu nécessaire une stratégie d'échantillonnage statistique poussée, consistant à déterminer des zones de haute représentativité afin d'optimiser l'investissement dans l'acquisition de données pédologiques.

Vers un premier SIG embryonnaire « fait maison »

Cette démarche s'appuyait sur une cartographie numérique des principaux facteurs potentiellement explicatifs de la couverture des sols (altitude, pente, géomorphologie, occupation et préparation des sols, etc.), facteurs qu'il s'agissait de croiser afin de déterminer la représentativité combinatoire surfacique. Ne disposant pas d'un environnement informatique adéquat pour acquérir, traiter, et représenter l'information géographique, je commençais à écrire de petits algorithmes qui ont débouché sur un SIG embryonnaire et dédié : SICA (Système d'Information Cartographique Auradé – le prototype non publié du logiciel Cartima, cf. chapitre 3, § 3). Ecrit en langage C, SICA fonctionne sous DOS et nécessite une carte graphique VGA et 512 Ko de RAM. Cet outil permettait la saisie des attributs dans une maille raster de 50m de coté, leur mise à jour, la présentation cartographique, le croisement et l'analyse statistique à plusieurs échelles : bassin entier, sous-bassin, parcelle (cf. fig. 22 et 23).

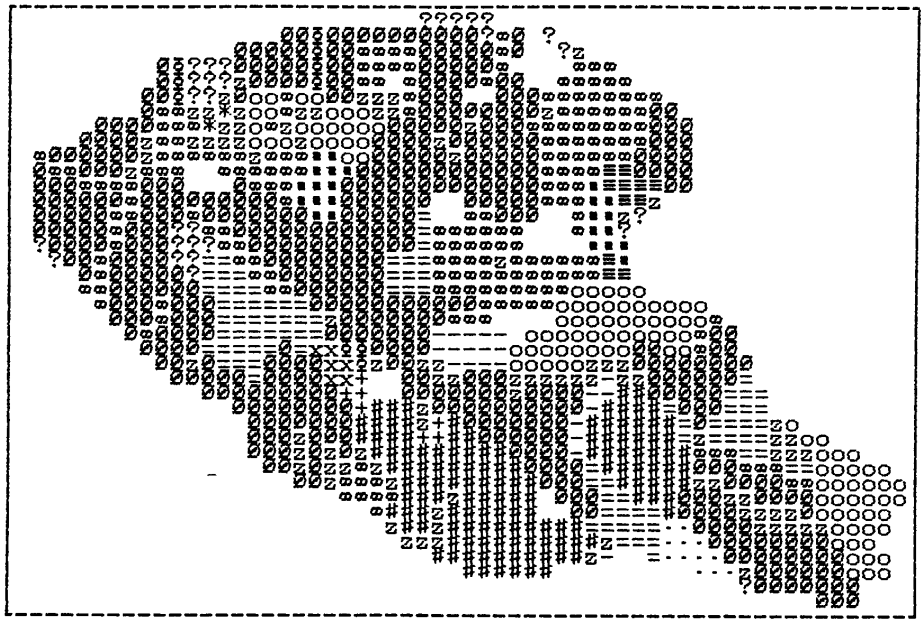


Fig. II 32 : Carte du reliquat d'azote minéral (kg/N/ha) et du type de cultures (nombre de cultures d'été sur 3 ans) - synthèse des années agricoles 1985/86 à 1987/88
Légende: 1. . 2. o 3. Ø 4. ∞ 5. ▒ 6. ▪ 7. - 8. = 9. ≡ 1Ø. # 11. + 12. x 13. * 14. ? 15. z (signification: cf. fig. II 33)

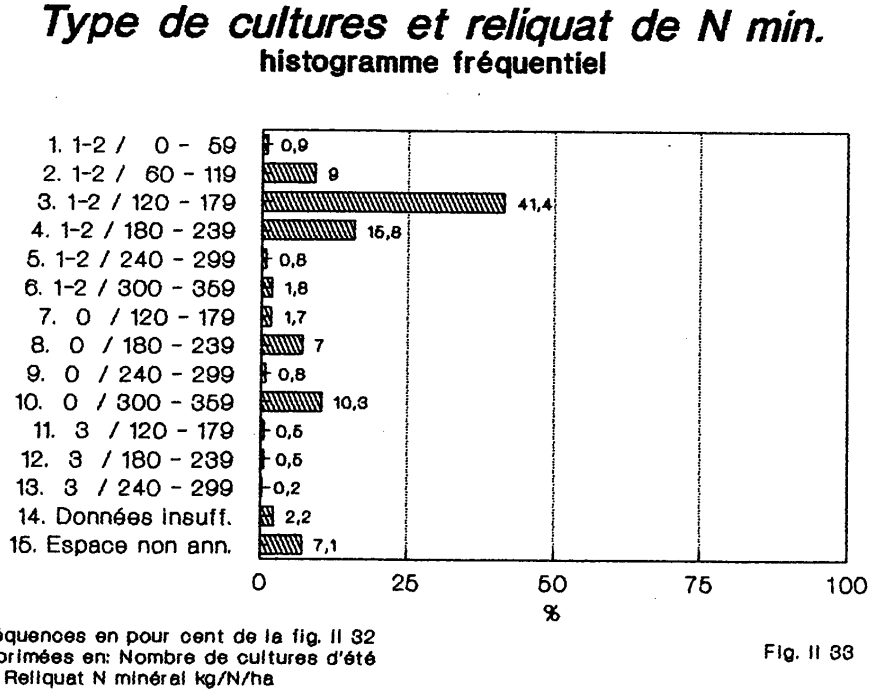
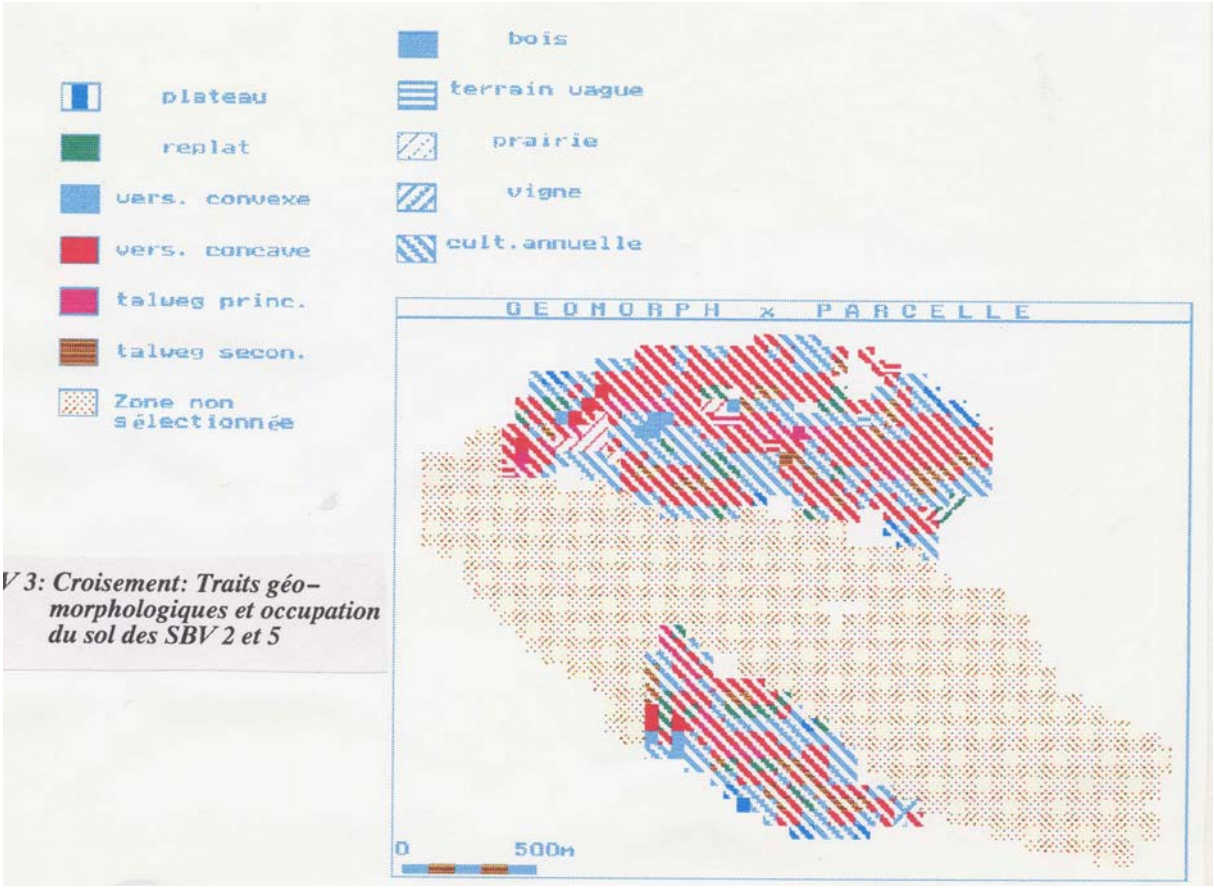


Fig. 22 : Exemple d'une cartographie et d'un histogramme fréquentiel produits par SICA.
Source : Paegelow, 1991a



V 3: Croisement: Traits géo– morphologiques et occupation du sol des SBV 2 et 5

Fig. 23 : Exemple d'un croisement entre deux plans d'information assorti d'un masque géométrique (restriction à deux sous-bassin versants). *Source : Paegelow, 1991a*

Emploi d'une méthode d'analyse spatiale informatisée

La détermination de sites représentatifs (appelés ZEHR – zones élémentaires de haute représentativité) de l'ensemble du bassin versant quant à leur combinaison paramétrique en vue de constituer une cartographie des sols, a été réalisée selon une méthode multivariée à caractère spatial (préservant la localisation) traitant les différentes données au niveau statistique nominal. Après une étude préalable (coefficient de corrélation, test chi2, matrice de contingence), l'analyse de ressemblance multivariée débouchait sur un groupement hiérarchique agglomératif avec identification des ZEHR (cf. figure 24).

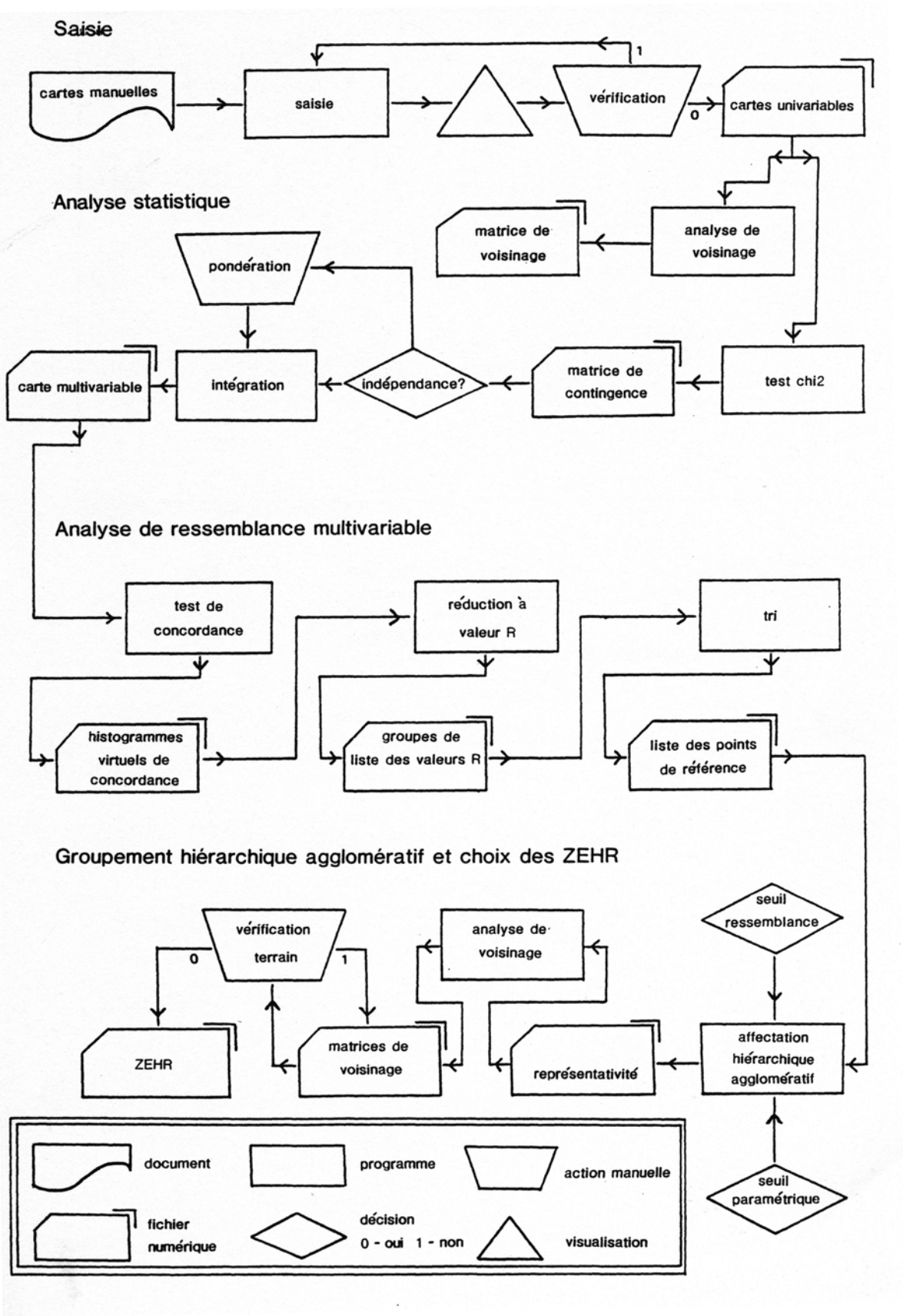


Fig. 24 : Procédure de détermination des ZEHR. *Source : Paegelow, 1991a*

L'emploi et l'adaptation de la méthode (Fränzle et al, 1987 ; Paegelow, 1991a) illustrent à nouveau tout l'intérêt de l'approche géomatique et, en 1990, de la nécessité de savoir implémenter sur machine une méthode ne faisant pas partie des analyses standard des logiciels statistiques. Il fallait savoir programmer ou évoluer dans un environnement institutionnel disposant d'informaticiens – une situation encore rare dans la géographie française à cette époque.

Utilité des méthodes géostatistiques

Etant statistiquement assuré de la représentativité des zones où furent réalisées les sondages pédologiques, il fallait néanmoins déterminer le degré de portée spatiale de leurs principaux paramètres (granulométrie, pH, taux de calcaire, matière organique, concentration en nitrates). A ces fins, des sondages systématiques, équidistants seulement de quelques mètres, furent entrepris sur trois sites. Pour chacun d'eux, un total d'environ 50 sondages, allant parfois à deux mètres de profondeur, constituait une base statistique solide.
Des analyses variographiques et le krigeage confirmaient la très grande variabilité de certains paramètres (notamment certaines fractions granulométriques et la teneur en $N\text{-}NO_3$-). La figure 25 montre les concentrations (ppm) en N-NO3- de la couche arable (5 à 20 cm de profondeur) de la ZEHR n° 1 d'Auradé. La variabilité des mesures espacées respectivement de sept mètres (parallèle à la pente) et de dix mètres (dans le sens de la pente) n'autorise pas une interpolation statistiquement fondée.

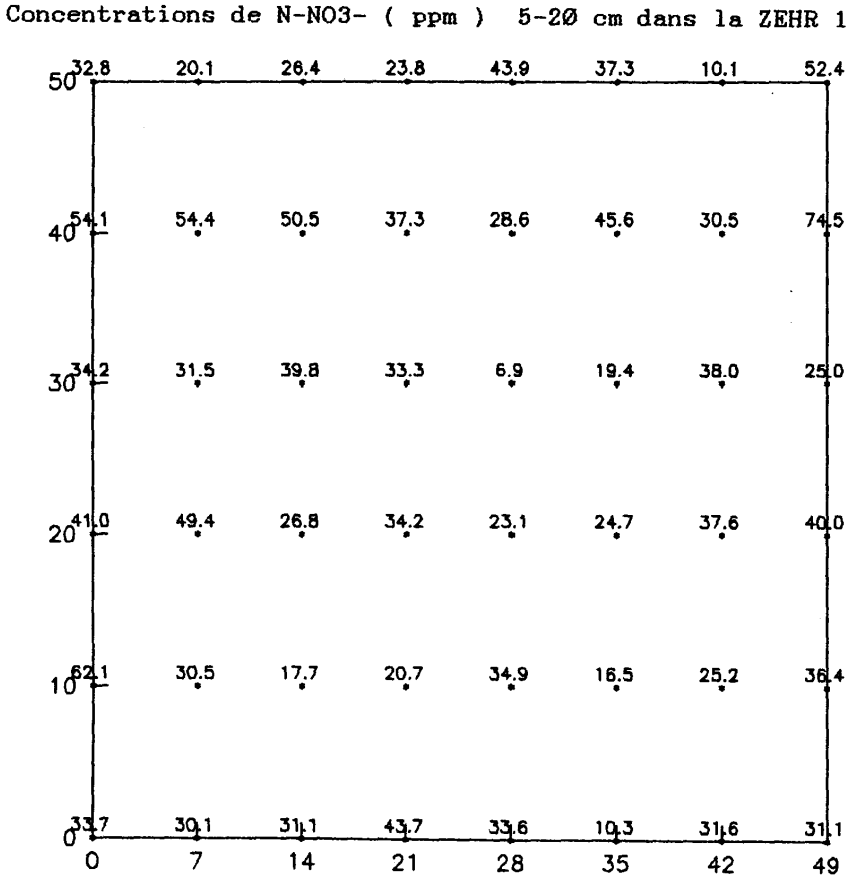


Fig. 25 : Concentrations (ppm) en N-NO3- de la couche arable (5 à 20 cm de profondeur) de la ZEHR n° 1 d'Auradé. *Source : Paegelow, 1991a*

Les mesures d'autres paramètres comme la teneur en matière organique, en $CaCO_3$ ou encore la profondeur du sol ont souvent pu être interpolés (fig. 26).

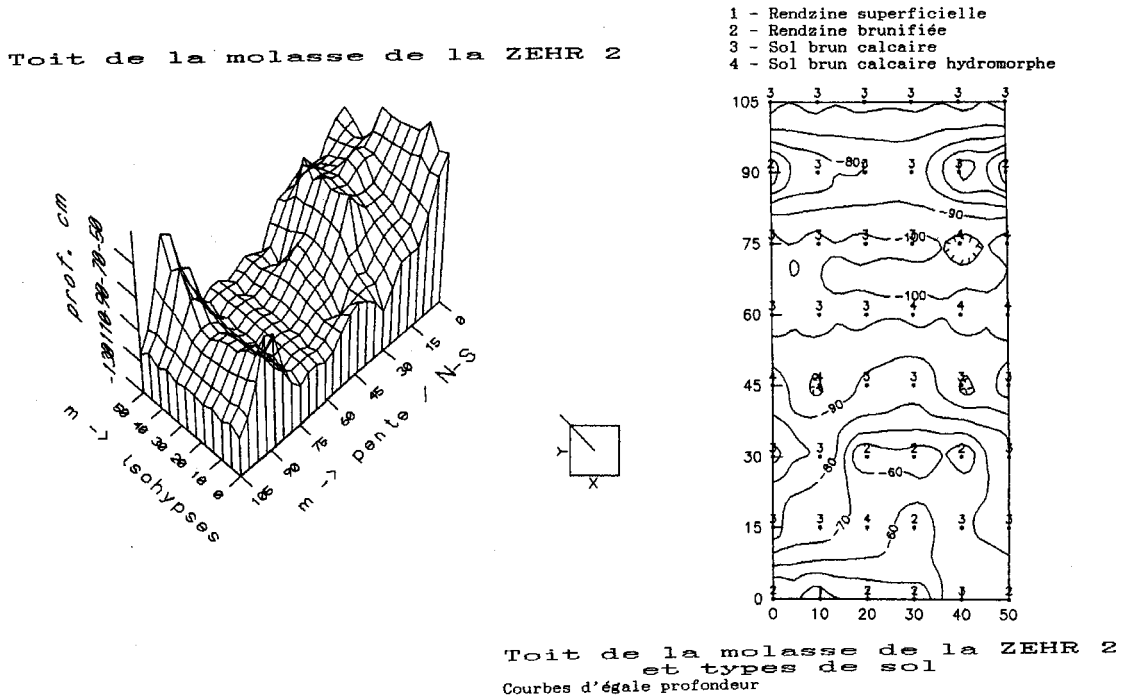


Fig. 26 : Cartographies du toit de la molasse dans le ZEHR n° 2 d'Auradé, obtenues par krigeage validé au préalable par variographie. *Source : Paegelow, 1991a*

Expérimentation in situ

Parallèlement à la modélisation des sols, le pan appliqué des recherches doctorales consistait en une sorte de prescription d'usage de l'espace visant à réduire les transferts des nitrates hors du système culture-sol. Notre rôle se bornait à un aménagement paysager de l'espace tandis que des agronomes du CRAT (Centre de Recherches Agronomiques de Toulouse de la Société Chimique Grande Paroisse) cherchaient par divers moyens (fractionnement des apports en N, retardement de l'enfouissement des pailles, …) d'optimiser la conduite des cultures afin de réduire les conséquences environnementales néfastes des engrais apportés. Toujours dans un souci de travailler sous conditions réelles nous utilisions des bougies poreuses implantées dans plusieurs sites, repérés grâce à SICA, se comportant potentiellement comme des pièges à nitrates. Si l'emploi de bougies poreuses ne permet pas d'établir un bilan quantitatif des transferts des solutés du sol, cette méthode souple et peu contraignante pour la conduite de la culture renseigne néanmoins sur la concentration de la solution du sol en nitrates dans le voisinage immédiat du dispositif. Nous l'avons utilisé dans plusieurs zones sensibles quant aux transferts des nitrates du système culture-sol vers les eaux de surface. Ces zones dites sensibles correspondent soit à des périmètres de dénitrification naturelle (zones hydromorphes propices à l'abaissement du Eh, le potentiel d'oxydo-réduction du sol et une anaérobiose au moins temporaire) que sont les mouillères collinaires, soit des reliquats d'éléments paysagers structurant l'espace agraire comme les linéaments arborés, les haies ou encore les prairies en situation de fond de talweg. En effet, tous ces éléments tampon

s'avèrent être des véritables pièges à nitrates. Notamment le suivi des concentrations en $N\text{-}NO_3$- dans un complexe haie / prairie de fauche en situation de fond de vallon a démontré la valeur environnementale de ce type d'élément paysager traditionnel (Paegelow et al., 1990 ; Paegelow et Hubschman, 1991).
Sur la base de ces résultats très prometteurs, nous avions convaincu et le service bassin-versant de la SCGP et les agriculteurs concernés de convertir environ un tiers de hectare de terres arables en bande enherbée et ceci dans le sous-bassin le plus artificialisé où les berges du ruisseau étaient complètement dénudées de végétation et exposées directement à l'illuviation en provenance des cultures qui s'avançaient, en certains points, jusqu'au ras du talweg. La recréation d'une prairie de fauche bordant le ruisseau sur une largeur variable entre six et quinze mètres a démontré l'efficacité d'un aménagement agro-paysager tirant profit des zones naturellement hydromorphes. Un enherbement large de douze mètres suffit à lui seul de ramener les concentrations en nitrates au-dessous du seuil de potabilité. La figure 27 montre une vue du sous-bassin versant (SBV) 5 d'Auradé en direction du sud-est, été 1990. Au premier plan on voit la tête du SBV, formé essentiellement par une seule parcelle agricole s'étalant sur environ 25 ha. On distingue au centre de la photographie une zone verte (flèche), de forme allongée, marquant le début du drainage linéaire surfacique permanent du SBV. Il s'agit de l'enherbement unilatéral du Montoussé mis en place en 1990

Fig. 27 : Vue du sous-bassin versant (SBV) 5 d'Auradé en direction du sud-est, été 1990.
Source : Paegelow et al., 1990

La figure 28 montre un gros plan de la bande enherbée (cf. fig. précédente) à la fin du printemps 1990 (vue en direction du nord-est). Au premier plan, un piquet marque l'implantation d'un lot de bougies poreuses situé au bord du ruisseau (présence de prêles) en

aval d'une zone enherbée, large ici de douze mètres. En arrière plan : la localisation du lot de bougies poreuses témoin (bord de la parcelle cultivée).

Fig. 28 : Gros plan sur la bande enherbée à la fin du printemps 1990. *Source : Paegelow et al., 1990*

Mesures dites passives contre la pollution par les nitrates

Sur la base de tous les résultats, un ensemble de mesures antipolluantes (fig. 29) a été proposé (enherbement des bords de ruisseau, maintien d'une végétation permanente sur sites hydromorphes, insertion de mares sur les axes de drainage des bassins élémentaires, diminution des apports en N à proximité de l'axe des vallons, …). Conjuguées à une gestion culturale plus respectueuse de l'environnement, ces mesures dites passives suffisent à concilier agriculture performante et préservation d'une qualité environnementale sur le plan de la potabilité de l'eau en ce qui concerne la concentration en nitrates (Paegelow, 1991b, 1992 et 1994).

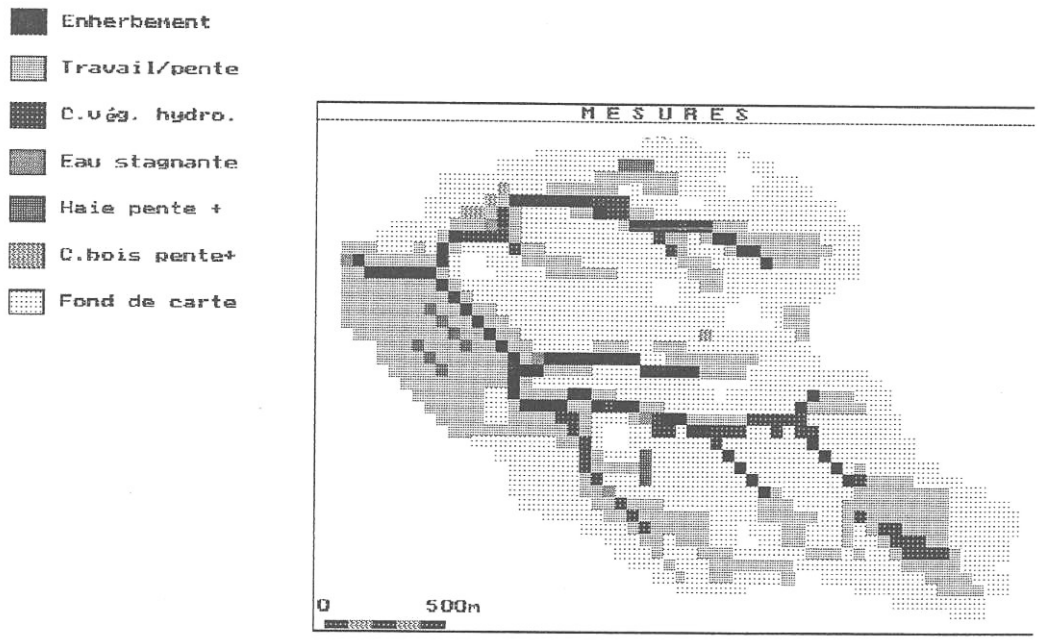


Fig. 29 : Carte des mesures antipolluantes proposées. *Source: Paegelow, 1991a*

Après la thèse j'ai continué à travailler sur les aspects pédologiques et de pollution dans le cadre du bassin versant expérimental d'Auradé, notamment sous forme d'encadrements de travaux de maîtrise (Grosbois, 1995), de DEA (Grosbois, 1996) et d'accompagnement de recherches doctorales (Ribeyreix-Claret, 2001).
J'ai toujours le projet de valoriser les recherches menées sur le site d'Auradé par un SIG multimédia d'accès en ligne. En effet, riche de vingt ans d'observations, de mesures et d'expérimentations diverses, Auradé est un des rares observatoires environnementaux en France méridionale, associant une telle profondeur historique à un mode d'exploitation agricole ordinaire et une forme d'organisation sociale des acteurs assurant la pérennité de l'expérience agro-environnementale commencée en 1983 (cf. partie III, chapitre 1, §3).

3.3. De SICA à Cartima, une parenthèse en entreprise

Concevoir un logiciel SIG – rêve et réalités

Suite à mes recherches doctorales et après ma thèse, soutenue au printemps 1991, j'ai d'abord approfondi et mis en valeur mon expérience géomatique dans le cadre d'une modeste entreprise informatique créée en binôme[6]. Ce statut très libre nous a permis de généraliser le concept de SICA, tout en y ajoutant un certain nombre de fonctions géomatiques et de modules périphériques : *Cart*ima. Il s'agit d'un logiciel situé à mi-chemin entre la cartographie automatique et les SIG et fonctionnant en mode image, qui a été commercialisé depuis 1992 et dont le dépôt a été enregistré en 1994 (Paegelow et Prohon, 1994).

[6] SARL Turbosoft dont le capital a été détenu à parts égales par Philippe Prohon et moi-même.

Analysée aujourd'hui à la lumière froide de notre société dite d'information, cette tentative a des allures surréalistes. Cependant, en 1991 il n'y avait pas, en France, de logiciels SIG fonctionnant sur les micro-ordinateurs de type PC. Même deux ans plus tard, quand j'ai été amené à participer à l'équipement géomatique du CIMA URA 366 CNRS[7], nous avions le choix entre ArcInfo, en langue anglaise et fonctionnant sous station de travail Unix et un nombre très limité de logiciels SIG sur PC. Au tout début des années 1990, les produits disponibles sur PC s'apparentaient beaucoup plus à des logiciels de CCAO (conception cartographique assistée par ordinateur). Tous ces programmes fonctionnaient déjà en mode vectoriel et se bornaient à cartographier le résultat de requêtes relativement simples, effectuées sur une base de données. Il s'agit là de deux facteurs limitants majeurs de ces logiciels :

- Le choix du mode conceptuel vectoriel garantissait certes, au moins à l'époque, un rendu cartographique plus satisfaisant, mais interdisait pratiquement toute la gamme des analyses spatiales allant du simple filtrage aux techniques d'aide à la décision les plus poussées.
- Aucun croisement de plans d'information n'était possible – autrement dit, la production d'une nouvelle information se trouvait bloquée.

Pour un géographe mettant l'espace au centre de sa démarche, la critique quant au choix du mode vectoriel reste toujours d'actualité. Outre le fait que l'analyse spatiale n'est véritablement développée qu'en mode raster, les logiciels SIG vectoriels ressemblent souvent, au moins dans leur version de base (hors modules supplémentaires généralement coûteux), à des boîtes relativement vides. Les outils qu'ils proposent se limitent souvent à l'algèbre booléenne pour l'analyse verticale et à l'algèbre relationnelle pour l'analyse attributaire. Si la notion d'objet, rendue possible par le couplage d'une base de données attributaire à un plan d'information contenant des objets spatiaux, ouvre la porte à de nombreux traitements, il faut rappeler qu'elle n'est pas propre à la représentation vectorielle. Bien que celle-ci – s'appuyant sur la notion d'objet graphique – débouche logiquement sur le concept d'objet géographique, le mode raster, généralement limité à un seul attribut (le compte numérique du pixel), offre la même souplesse à travers la notion de pseudo-objet (cf. chapitre 2, § 2).
Les raisons nous ayant conduit à la conception de *Cart*ima étaient multiples. Outre la conviction que le mode raster offre une palette de traitements plus riches que son équivalent vectoriel, nous pensions que le marché des logiciels SIG, bien qu'en phase de structuration, offrirait assez de souplesse et de taux de croissance pour un produit supplémentaire.
Avant de tirer les conclusions de cet essai, il me semble important de présenter sommairement le produit que nous avions conçu.
Le logiciel principal, *Cart*ima, est un éditeur de cartes ayant des fonctionnalités SIG. Il est accompagné de trois utilitaires (cf. fig. 30) : *Cart*ifor, gérant les principaux formats d'images pour l'importation et l'exportation des données, *Cart*isym, éditeur de pictogrammes et *Cart*ibas, un gestionnaire de base de données relationnelles. Ce dernier permet de numéroter, de sélectionner et de mettre à jour des zones raster (autrement dit, des pseudo-objets) et de visualiser des résultats de requêtes effectuées sous tableur ou SGBD.

[7] Devenu entre temps GEODE UMR 5602 CNRS

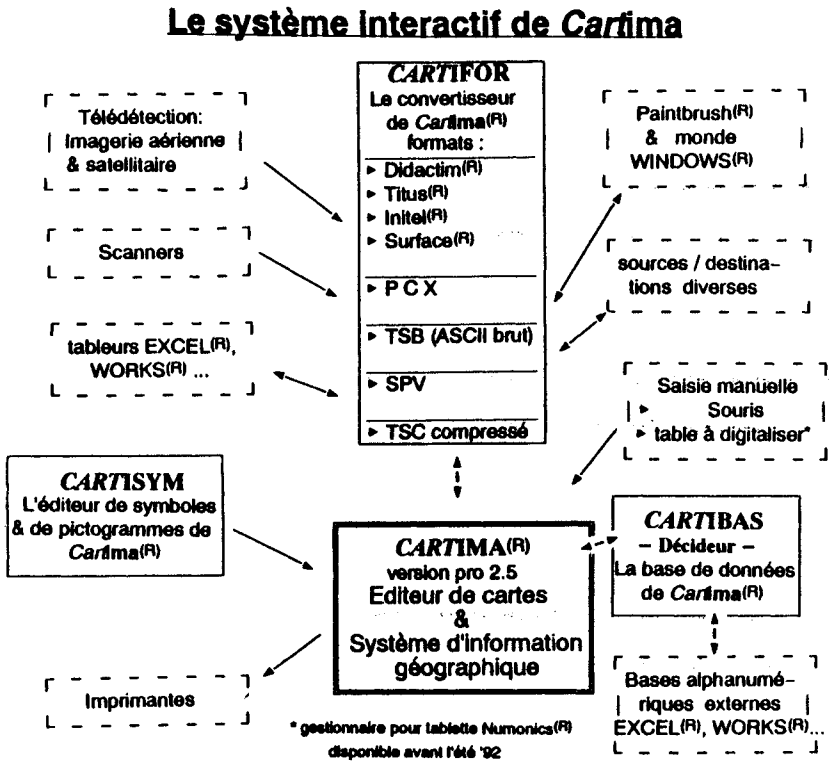


Fig. 30 : Organigramme de Cartima. Source : Paegelow et Prohon, 1994

Le logiciel principal permettait, contrairement aux logiciels CCAO, de créer des cartes, de les éditer (notion de copier-coller) et d'effectuer une mise en page cartographique sommaire (Nord géographique, échelle, superposition d'une couche vectorielle contenant des graphiques, symboles et toponymes). En tant que traitements de base on peut citer l'agrandissement et la réduction des cartes ou encore la sélection par tri paramétrique des composantes de la carte raster. Les fonctions d'analyse verticale, considérées comme la caractéristique propre des SIG, étaient au nombre de trois :

- Le croisement paramétrique : il s'agit d'une intersection entre deux cartes paramétrée par l'énumération des éléments à conserver dans chacune des cartes mères.
- L'insertion : possibilité d'insérer une sélection de catégories d'une carte dans une autre.
- La fusion : elle additionne les paramètres de deux cartes. Pour ceci, il convient de concevoir les légendes de manière à conserver la couleur de la première carte à laquelle on ajoute la trame de la seconde.

A cela s'ajoutent deux filtrages servant, d'une part, à faire ressortir certains traits (filtre passe-haut avec seuil de rejet paramétrable) et, d'autre part, d'homogénéiser les comptes numériques par un filtre passe-bas. Dans les deux cas, la taille du filtre est paramétrable. Une analyse de voisinage permet également de faire ressortir l'entrelacement paramétrique des

catégories d'une carte. Une autre fonction intéressante est le calcul de d'indicateurs de la statistique descriptive et leur visualisation graphique sous forme d'histogrammes.

Au total, cette incursion dans le monde de l'entreprise n'aura duré qu'un an et demi. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet échec :

- En premier lieu, ma méconnaissance totale de l'importance du volet commercial. Décidemment, j'étais un géographe ayant acquis certaines compétences informatiques mais pas un entrepreneur.
- La conception du produit, vendu à une petite vingtaine d'exemplaires, reposait sur une erreur stratégique : la compatibilité totale avec des PC à processeur 8088 sous DOS. Bien que les processeurs plus performants commençaient à se répandre dans le parc informatique et que les PC disposaient fréquemment d'une mémoire vive, dite haute, dépassant le seuil fatidique des 640 KO, nous tenions à ce que le programme fonctionne correctement sur l'ensemble du parc de PC installés. Le prix à payer pour cette compatibilité était lourd. Il cantonnait le logiciel à n'utiliser que la mémoire vive basse, standard, limitant de fait la taille des cartes raster à 450 colonnes sur 300 lignes.
- Le logiciel était programmé afin de fonctionner sous DOS. Ce système d'exploitation, ancêtre de Windows, imposait à chaque programme de gérer lui-même les périphériques. Autrement dit : il fallait sélectionner une liste d'imprimantes raisonnable et écrire les pilotes pour ce type de matériel, sachant que la durée d'un modèle de périphérique sur le marché commençait à diminuer tandis que leur nombre était en forte augmentation.

Conjuguées à l'arrivée de Windows – ce qui impliquait une reprogrammation importante – et à la taille de la société, ces raisons sonnaient le glas de cette aventure. La diffusion gratuite du produit par le CNRS a échoué : il y a une dizaine d'années, la valorisation de la recherche n'était pas encore une priorité. Pourtant, malgré le caractère relativement éphémère de *Cart*ima, ce logiciel a montré son utilité dans un certain nombre d'études environnementales au début des années 1990.

3.4. D'un environnement à l'autre

Insertion progressive de la géomatique dans les recherches environnementales

Suite à mon intégration comme maître de conférences au Département de Géographie et Aménagement et mon rattachement au laboratoire CIMA (aujourd'hui GEODE), j'ai été amené à participer activement à la mise en place d'un SIG au laboratoire. Au début des années 1990, le choix était encore restreint : les logiciels qui dominent aujourd'hui le marché français n'existaient pas ou commençaient leur carrière commerciale sous forme de prototypes en langue anglaise, dotés de fonctionnalités encore peu développées. D'autres produits, déjà répandus à l'étranger, étaient (et restent parfois encore) quasi ignorés en France. Bref, après une phase de présélection, le choix se restreignait entre *ArcInfo* sur station de travail Unix et *Alliance*, nouveau produit régional fonctionnant sous Windows et

incomparablement moins onéreux. Le choix fut vite fait mais mal fait : *Alliance* n'a jamais fonctionné correctement et son développement a rapidement cessé avec le rachat de la société. Cette période, pendant laquelle les applications SIG ont été mises à rude épreuve, illustre bien ce que nombre d'auteurs qualifient de « phase d'émergence et de structuration de la géomatique » (cf. chapitre 1). Ce n'est qu'à partir des années 1995-1996 que la gamme de logiciels, devenus par ailleurs de plus en plus fiables, s'est notablement diversifiée. A l'heure actuelle, le laboratoire est doté d'*ArcView*, *MapInfo*, *ER-Mapper*, *Geoconcept* et d'*Idrisi* : c'est ce dernier logiciel qui constitue le socle de la plupart de mes recherches sur les dynamiques environnementales, comme on l'exposera dans les pages suivantes et, en particulier, dans la partie II (cf. notamment Métailié et Paegelow, 2000, 2004 ; Paegelow, 1995, Paegelow et Camacho Olmedo, 1997, 2003).
Mon activité de chercheur et d'enseignant s'est déployée dans deux directions. D'une part, j'ai cherché à insérer les méthodes géomatiques dans les différents axes de recherche du laboratoire comme dans un certain nombre de travaux conduits au Département de Géographie et Aménagement : études et travaux relativement diversifiés quoique clairement centrés, pour la plupart, sur des problématiques environnementales. D'autre part, j'ai poursuivi et approfondi mon propre cheminement de recherche en abordant les dynamiques spatio-temporelles des milieux montagnards, cheminement qui ouvrira bientôt sur les problèmes de modélisation prospective (cf. partie II).

Dans ce paragraphe sont présentées la majeure partie des recherches menées et encadrées dans le champ de la géographie de l'environnement. Si la plupart des travaux ont un caractère franchement thématique et ne font qu'appliquer des fonctionnalités géomatiques, certains ont une tonalité méthodologique plus prononcée. Nous regroupons l'ensemble des recherches en quatre catégories, sachant que cette typologie a, avant tout, une valeur structurelle de présentation et qu'existent de nombreux chevauchements entre elles :

- Recherches environnementales appliquées
- Prévention des risques
- Recherches à contenu méthodologique plus affirmé
- Analyses spatio-temporelles de dynamiques environnementales

Recherches environnementales appliquées

Nous regroupons sous cet intitulé des travaux visant plutôt à répondre à une demande sociale articulée, souvent assortis d'un cahier de charges relativement précis (Paegelow, 2003a). Il s'agit de recherches thématiques, ancrées dans la géographie de l'environnement, pour lesquelles la géomatique constitue clairement un outil de travail adéquat pour atteindre les objectifs fixés : analyse de questions environnementales complexes, aide à la décision, optimisation de réseaux ou encore la conception de bases de données géoréférencées, étape préalable à l'étude thématiques.

Rappelons néanmoins que beaucoup d'applications géomatiques élémentaires reposent sur l'utilisation *a minima* d'un SIG en tant que support matérialisé de connaissances dans des thématiques géographiques très variées. Pour nous limiter à quelques exemples, on évoquera des études d'optimisation des schémas de « circulation douce » (pistes cyclables) (Grasdepot, 2004) ou encore la restructuration d'anciens sites industriels en tenant compte d'aspects

environnementaux (Le Hel, 2000). De même, dans le cadre des recherches menées dans le BV d'Auradé, l'élargissement du périmètre d'étude (de 300 à 1 500 ha) nous a conduit à actualiser nos connaissances de la répartition spatiale des sols (Grosbois, 1995, 1996) et, en particulier, à établir un canevas géomorphologique de base (fig. 31).
Ces applications illustrent de manière exemplaire que le recours à un SIG n'est pas toujours justifié – l'utilisation d'un simple logiciel de cartographie automatique suffisant amplement pour accomplir ces tâches élémentaires.

Fig. 31 : Géomorphologie du bassin versant d'Auradé élargi. *Source : Grosbois, 1995*

Par contre, dans le travail sur le dépérissement de la châtaigneraie audoise (Gély-Deschamps, 1993 ; Paegelow et Gély-Deschamps, 1994) où le géoréférencement des données attributaires relatives au chancre du châtaignier, acquises par Gély-Deschamps durant ces recherches doctorales, était essentiel afin de sectoriser le milieu et de hiérarchiser la vulnérabilité des

châtaigneraies selon leur combinaison attributaire, on est déjà de plein pied dans les fonctionnalités SIG. En l'occurrence, il s'agit de la dernière application du logiciel *Cart*ima (cf. fig. 32).

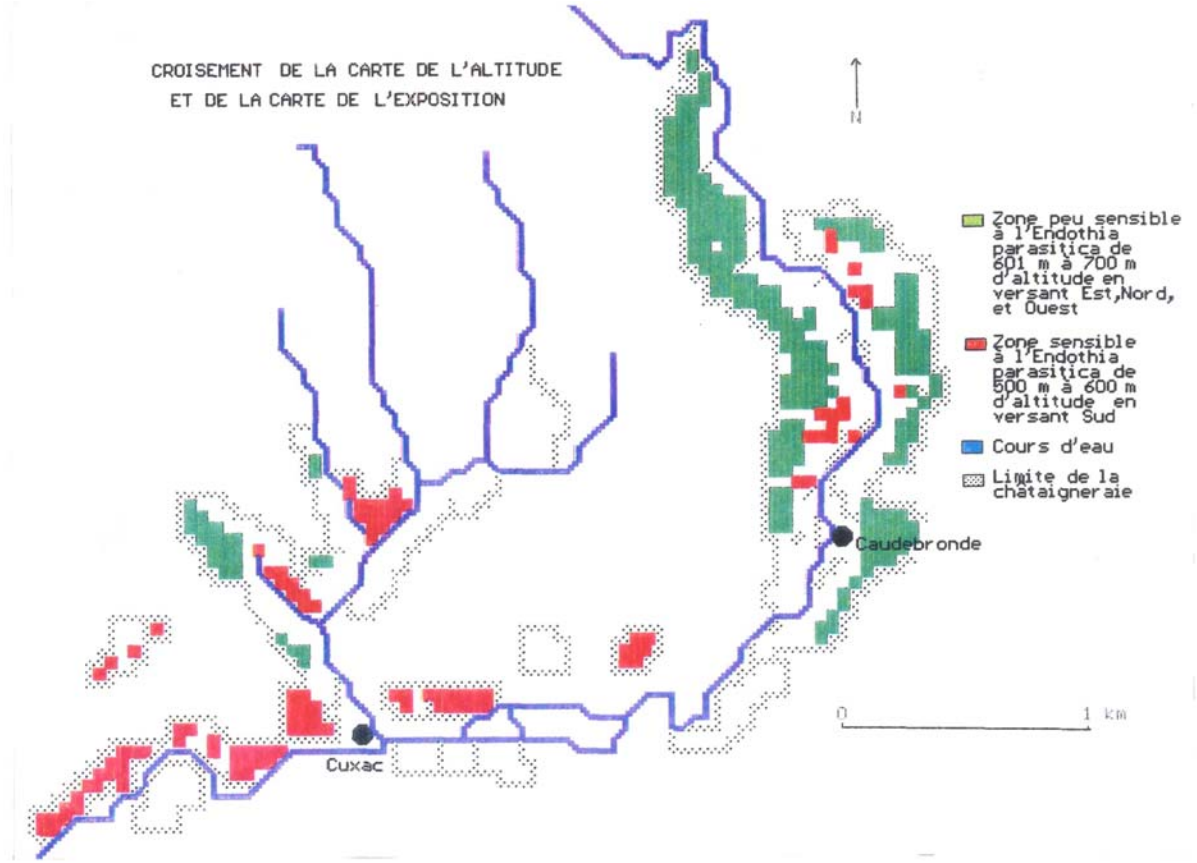


Fig. 32 : Croisement entre l'altitude et l'exposition afin de sectoriser le terrain d'études selon la vulnérabilité des châtaigneraies au champignon Endothia parasitica. *Source : Gély-Deschamps, 1993*

La constitution d'un SIG est souvent une étape préalable à la recherche thématique. Nous avons encadré plusieurs travaux montrant, à des degrés de complexité variés, l'utilité des SIG tout en soulignant que la conception d'un projet SIG signifie souvent un investissement relativement lourd. Tel sont les cas d'Ancrenaz (2002) qui a conçu une base de données nationale pour répertorier les plantes aquatiques invasives (fig. 33), de Le Jeune et Prats (2003) qui ont mis en place un SIG pilote servant à la restructuration du vignoble de Madiran-Pacherenc, ou encore de Dos Santos (2002) qui a conçu un projet SIG dans le cadre de Natura 2000, pour l'association Landes – Nature (fig. 34).

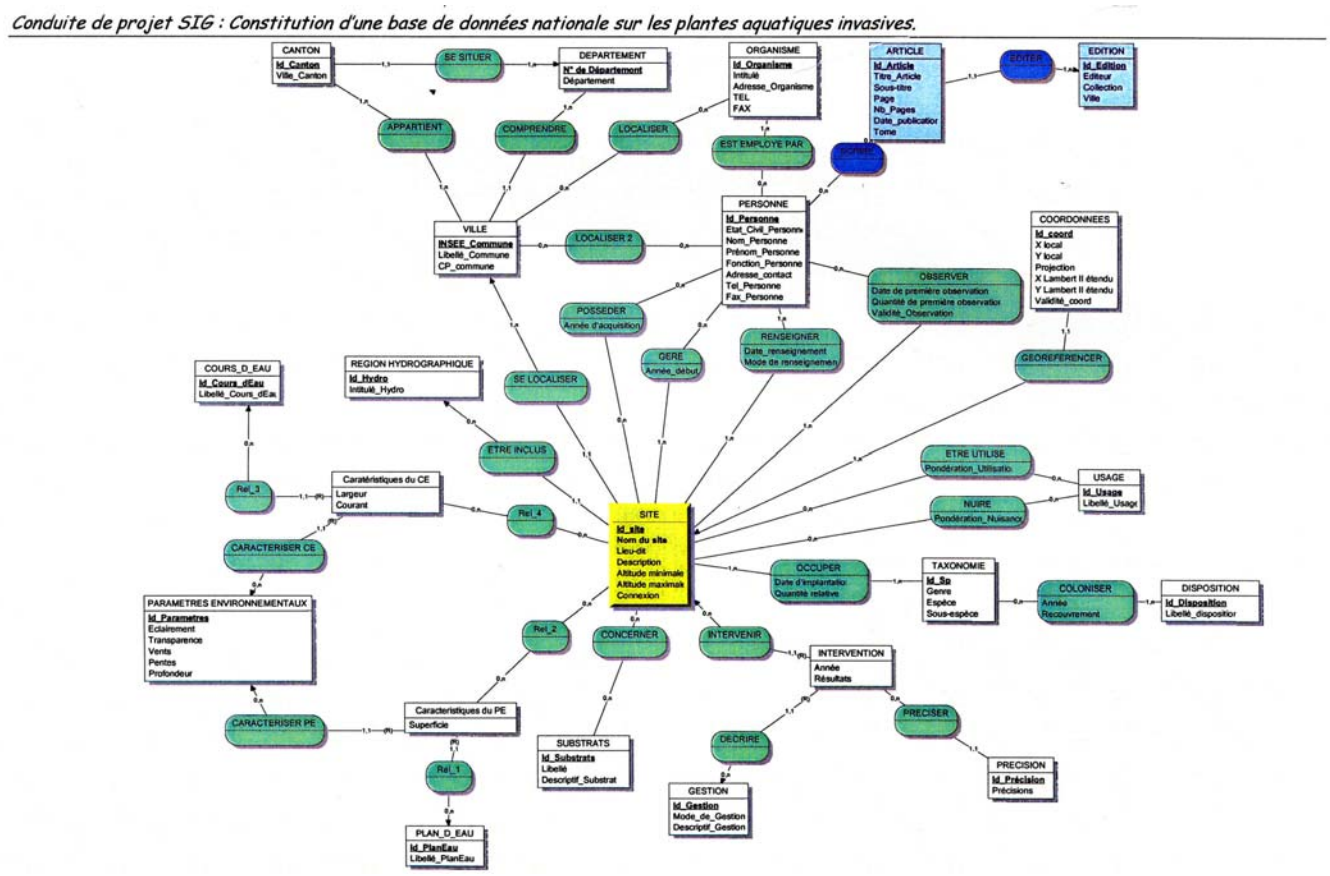


Fig. 33 : Modèle conceptuel de données (MCD) d'une base de données nationale pour la lutte contre les plantes aquatiques invasives. *Source : Ancrenaz, 2003*

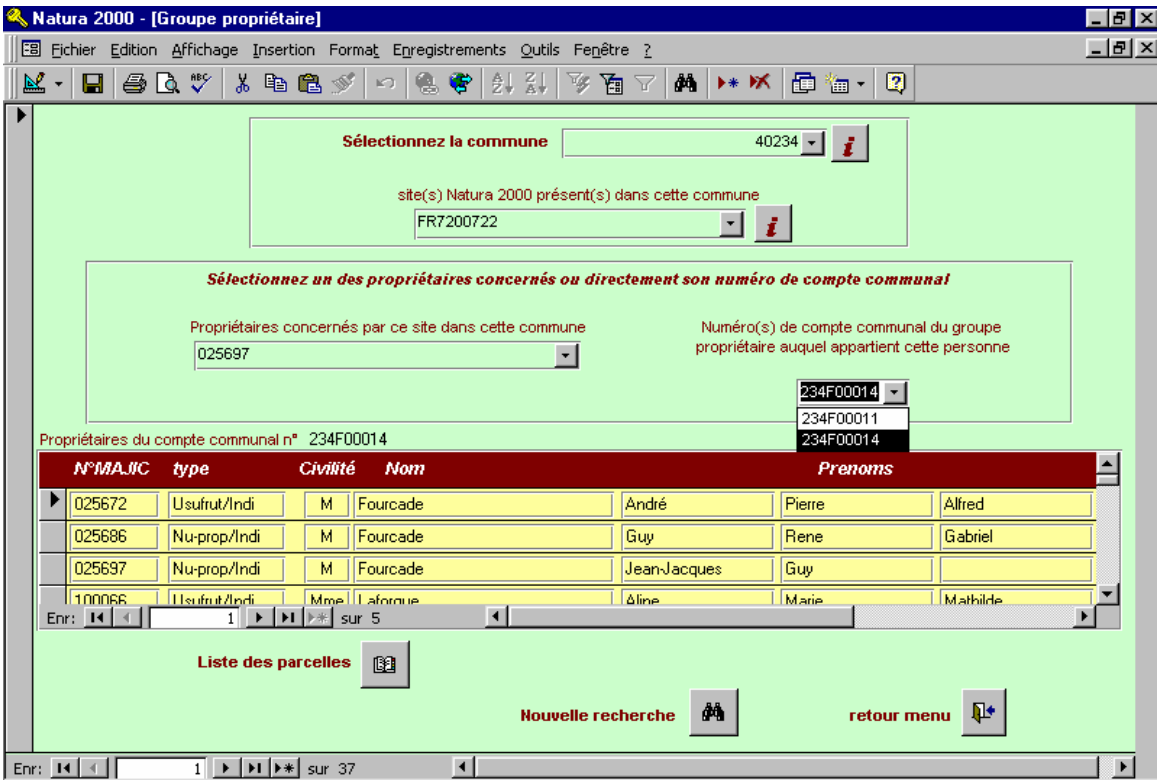


Fig. 34 : Formulaire de saisie Access du groupe de propriétaires dans le cadre de la constitution d'un SIG Natura 2000 (directive habitat) pour le compte de l'association Landes – Nature. *Source : Dos Santos, 2002*

Prévention des risques

Aujourd'hui, l'emploi des SIG est devenu courant aussi bien pour la prévention que pour la lutte contre les risques naturels ou technologiques. Dans les thématiques étudiées au sein du GEODE – notamment l'étude historique et la prévention opérationnelle des risques dits naturels – on peut citer l'arsenal d'outils d'aménagement de l'espace que sont les PPR (plan de prévention de risques) ou encore les PAFI (plan d'aménagement forestier contre les incendies).
L'encadrement de travaux universitaires, portant notamment sur le risque d'inondation (Rollot, 2003 ; Favre, 2004), mais aussi sur une exposition multirisque (Vezon, 1999 ; Ayral, 2000 ; Lamiscarre, 2003) dans des situations géographiques variées, m'a conforté dans l'idée que je me faisais depuis la fin des années 1980 de l'utilité pratique, puis de l'aide à la décision et la gestion territoriale que les SIG peuvent apporter.
Ainsi Ayral (2000) a pu démontrer, grâce à la prise en compte de l'historicité du risque (fig. 35), l'exposition ancienne d'une commune montagnarde haut-garonnaise à des aléas de nature différente – une exposition qui, dans le cadre du développement du village (enjeux), surtout pendant la période d'après-guerre, s'est transformée en situation à risques.

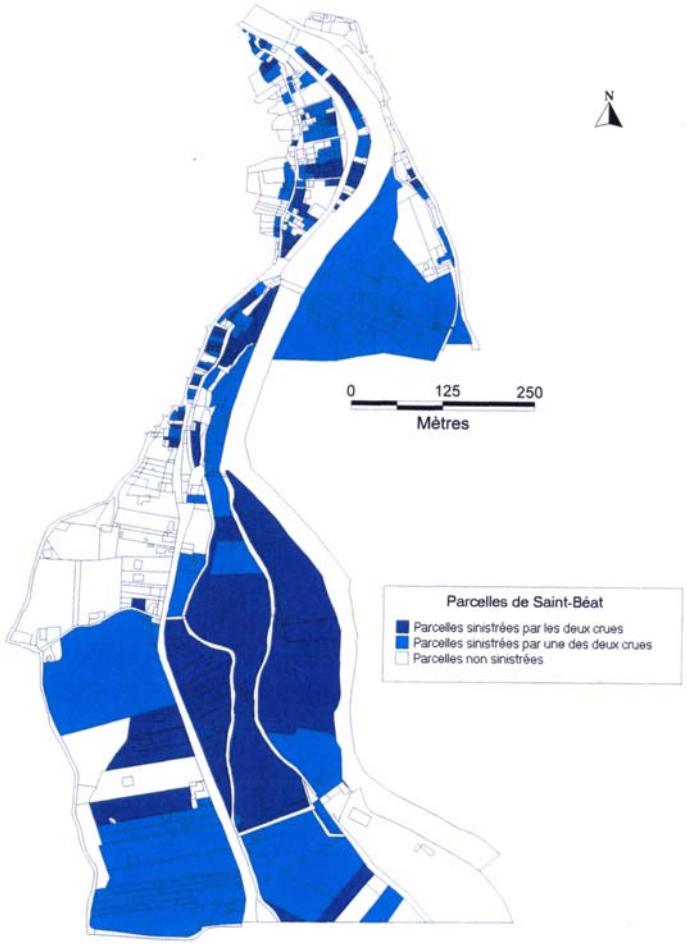
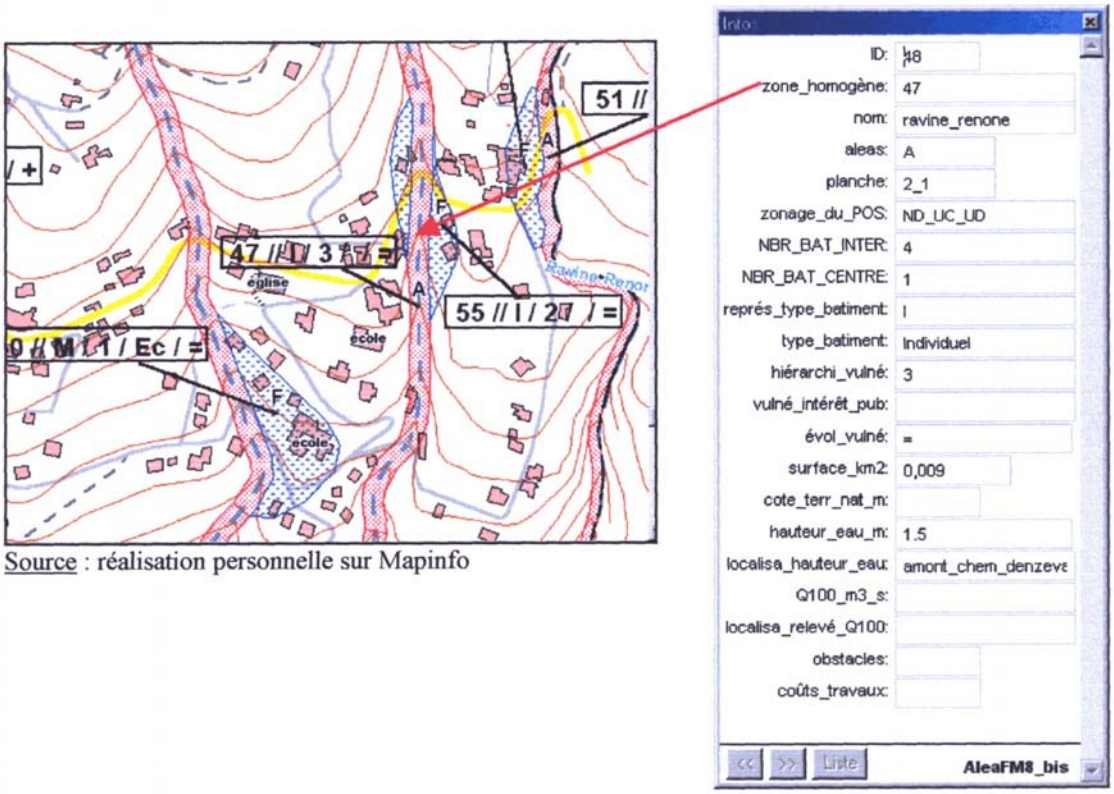


Fig. 35 : Historicité du risque à Saint-Béat : cartographie sur fond cadastral numérisé des parcelles inondées lors des crues de la Garonne de 1875 et / ou de 1897. *Source : Ayral, 2000*

Lamiscarre (2003) démontrait pour sa part le clivage existant entre la France métropolitaine et certains DOM TOM en matière de gestion du risque. Ainsi constatait-elle encore récemment à la Réunion une certaine faiblesse de la culture géomatique locale, aussi bien institutionnel qu'en matière de sous-traitance : peu de bureaux d'études sont présents sur l'île et leurs pratiques encore éloignées du « standard métropolitain ». A cela s'ajoute que la transposition de directives environnementales à la Réunion reste, dans une certaine mesure, stérile, à cause d'une conscience collective environnementale moins développée que sur le continent. Naturellement, on peut y objecter que l'exposition au risque n'y est pas une considération primordiale pour une population ayant des préoccupations davantage tournées vers le lendemain immédiat et ceci dans un contexte de pression foncière aiguë. Ainsi l'étude montre, par exemple, une variation du zonage des périmètres à risques selon la nature des documents et l'organisme producteur. Un nouveau renseignement attributaire du bâti en zones exposées s'est avéré nécessaire pour l'élaboration des PPR (cf. fig. 36).



Source : réalisation personnelle sur Mapinfo

Fig. 36 : Exemple de renseignement de la base de données SIG dans une zone exposée à des risques multiples sur l'île de la Réunion. *Source : Lamiscarre, 2003*

Rollot (2003) a pu quantifier le phénomène bien connu de l'impact de l'évolution du parcellaire et de l'occupation du sol sur le risque d'inondation. S'appuyant sur diverses cartographies à grande échelle et sur des missions aériennes d'après-guerre, elle a démontré le rôle du remembrement (fig. 37 et 38) dans un bassin versant élémentaire sur l'exposition au risque, notamment dans la partie aval du BV (commune de Labège, située dans la banlieue sud-est de Toulouse) – une zone périurbaine sous forte pression foncière depuis une vingtaine d'années (centre commercial, zones artisanales, lotissements pavillonnaires – extrémité nord-ouest des deux cartes présentées ci-dessous).

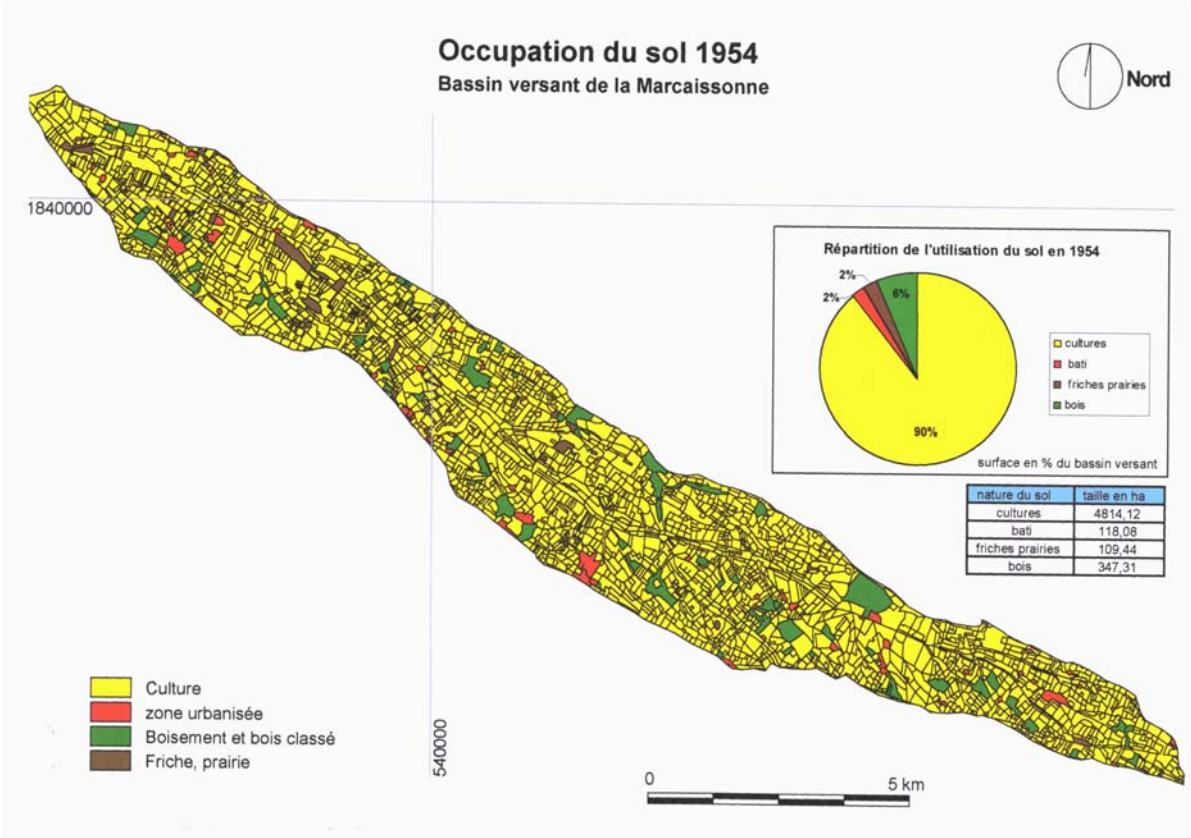


Fig. 37 : Occupation du sol en 1954 dans le bassin versant de la Marcaissonne (banlieue sud-est de Toulouse). *Source : Rollot, 2003*

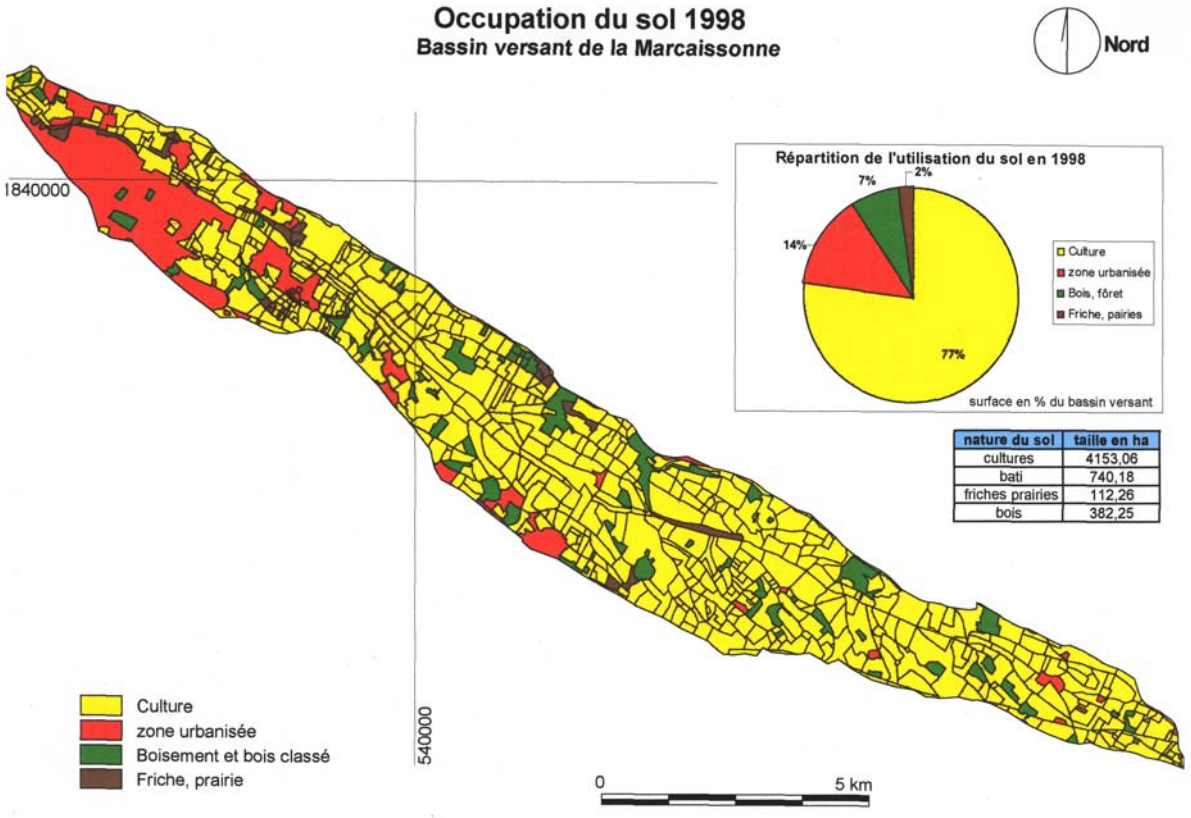


Fig. 38 : Occupation du sol en 1998 dans le bassin versant de la Marcaissonne (banlieue sud-est de Toulouse). *Source : Rollot, 2003*

Comme pour les PPR aujourd'hui, la mise en place de PAFI (plan d'aménagement forestier contre les incendies) a fait l'objet, depuis leur seconde génération durant les années 1990, d'un effort de standardisation, au moins à l'échelle régionale. L'élaboration d'un PAFI sous SIG dans le Cabardès Oriental (Aude) nous semble intéressant à mentionner à plusieurs égards. D'une part, elle illustre l'utilité des modèles numériques de terrain (MNT) au-delà de leurs applications classiques (carte des pentes, …). C'est ainsi que des cartes de visibilité du terrain à partir des différentes vigies (fig. 39) ont été calculées et ensuite croisées afin de localiser les zones échappant à une surveillance facile à partir des tours de guet. U n autre aspect technique intéressant est la combinaison de l'approche vectorielle (exploitation de la base de données relationnelle) et de l'approche raster (maillage DFCI – Défense de la Forêt Contre l'Incendie). Le carroyage de l'espace est ainsi classiquement utilisé pour établir diverses couches d'information (combustibilité, inflammabilité, …). C'est également le cas des cartes de risque de propagation de feu – un document qui doit tenir compte des risques existants à l'extérieur du périmètre d'étude. Les techniques de filtrage utilisées pour calculer les risques induits et subis se basent alors sur une zone tampon autour du périmètre considéré (fig. 40).

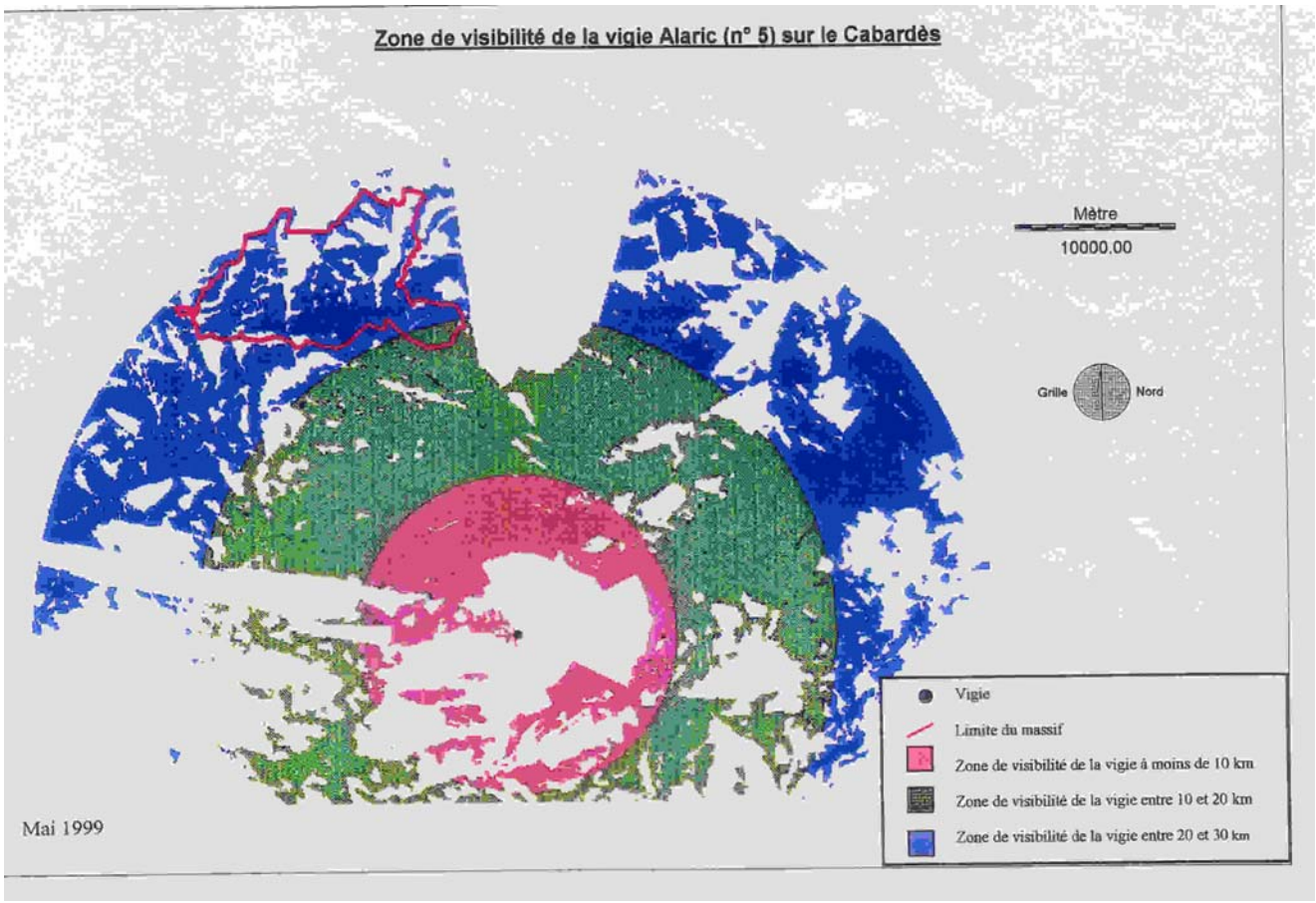


Fig. 39 : Carte de visibilité du terrain à partir de la vigie d'Alaric située au sud-sud-est du Cabardès Oriental (Aude). *Source : Fayolle, 1999*

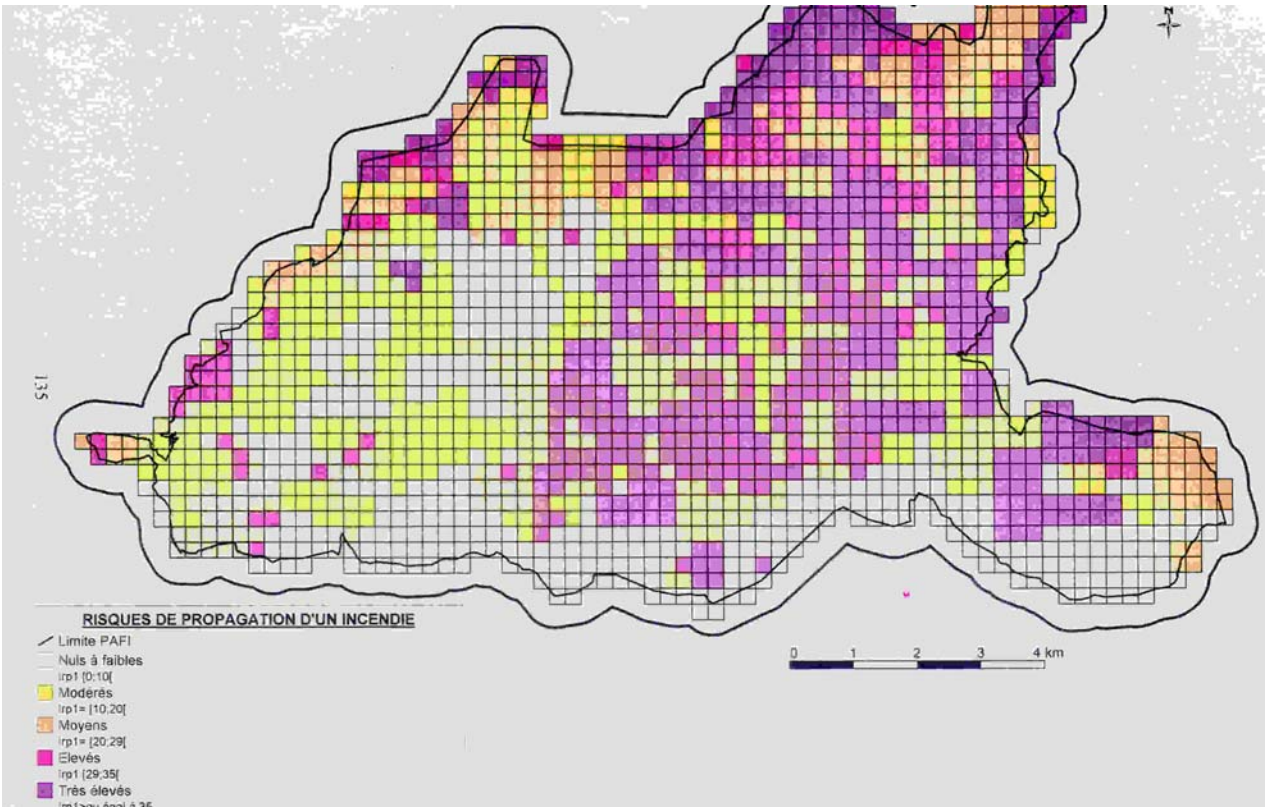


Fig. 40 : Risque de propagation d'un incendie. PAFI du Cabardès Oriental (Aude). Source : *Fayolle, 1999*

Mais ces recherches ont également révélé la fragilité et le caractère controversable de la démarche d'évaluation du risque. Cette faiblesse a été notamment pointée du doigt lors de la réalisation du PAFI dans le Cabardès Oriental (Fayolle, 1999) dont le cahier de charge, très précis, a été imposé, afin de garantir une comparabilité au niveau régional, alors qu'il a été élaboré à l'occasion de la révision d'un PAFI d'un autre massif présentant des caractéristiques (vents dominants, enclavement, etc.) différentes. Même en laissant ces aspects singuliers de coté, qui pourraient être résolus par une simple prise en compte de la diversité géographique dans le protocole, l'étude soulève des interrogations plus fondamentales. Celles-ci portent sur :

- La possibilité ou non de pouvoir quantifier certains enjeux. Ainsi se trouve-t-on rapidement confronté à des questions d'ordre éthique : combien vaut une vie humaine dans une analyse chiffrant les enjeux face au risque d'incendie ?
- La pondération aussi bien des aléas, des enjeux que des risques. En effet, il s'avère que l'application de coefficients légèrement différents peut aboutir – suite aux multiples croisements et agrégations des facteurs – à une appréciation finale très différente : la carte change de couleur !
- L'absence de prise en compte de l'inconnu et de l'incertitude. Le protocole du PAFI exige des données « dures » qui sont ensuite chiffrées, ne laissant aucune place au doute concernant la fiabilité des données et ne tolérant pas non plus l'absence de données. Ainsi, des données contestables sont-elles intégrées comme source valide et des données manquantes sont rapidement fabriquées dans des conditions pouvant être très éloignées d'une démarche scientifique.

Recherches à contenu méthodologique plus affirmé

Contrairement aux différents champs d'application thématiques esquissés jusqu'à présent, la progression méthodologique passe, en géomatique comme dans toutes les disciplines ou courants transdisciplinaires, par un intérêt particulier porté à l'outil même de la recherche. Si, en télédétection spatiale, l'interprétation thématique d'images satellitales constitue l'application la plus répandue, elle repose néanmoins sur un ensemble de recherches méthodologiques visant à mieux connaître la sensibilité des capteurs (physique), leurs interactions avec l'espace (physique de l'atmosphère, traitement du signal) ou encore la signification de la notion du pixel (étude de variation d'échelle spatiale et spectrale) (cf. Mabire, 1995 ; Seube, 2000). Il en est de même dans le domaine des SIG où de nombreuses recherches ambitionnent des avancées théoriques (description et amélioration des modes conceptuels de la représentation des données), une amélioration de l'interface homme-machine (IHM) ou encore l'implémentation de nouveaux concepts de gestion comme les algorithmes d'aide à la décision, pour ne citer que ces deux aspects. Ainsi, par exemple, l'occasion m'a été offerte d'encadrer un projet pilote portant sur la conception de bornes d'information interactives à installer sur le campus universitaire. Outre les tâches élémentaires de renseignements concernant divers services universitaires, le programme associe le SGBD à une localisation géographique des services et propose une cartographie contextuelle se basant sur la position de la borne elle-même – et, par conséquent, de son utilisateur – et celle du service demandé (Carton et al., 2003). Autre illustration, portant cette fois-ci sur les procédures d'aide à la décision à partir d'une comparaison entre l'analyse en composantes principales et une méthode d'évaluation multicritère (EMC) (Dos Santos et Frat, 2002 ; cf. fig. 41), permettant un choix dans la prise de risque et dans le niveau de compensation entre les facteurs retenus. Cette méthode, utilisée dans notre approche modélisatrice, est présentée de manière détaillée dans la partie II (chapitre 2, § 1).

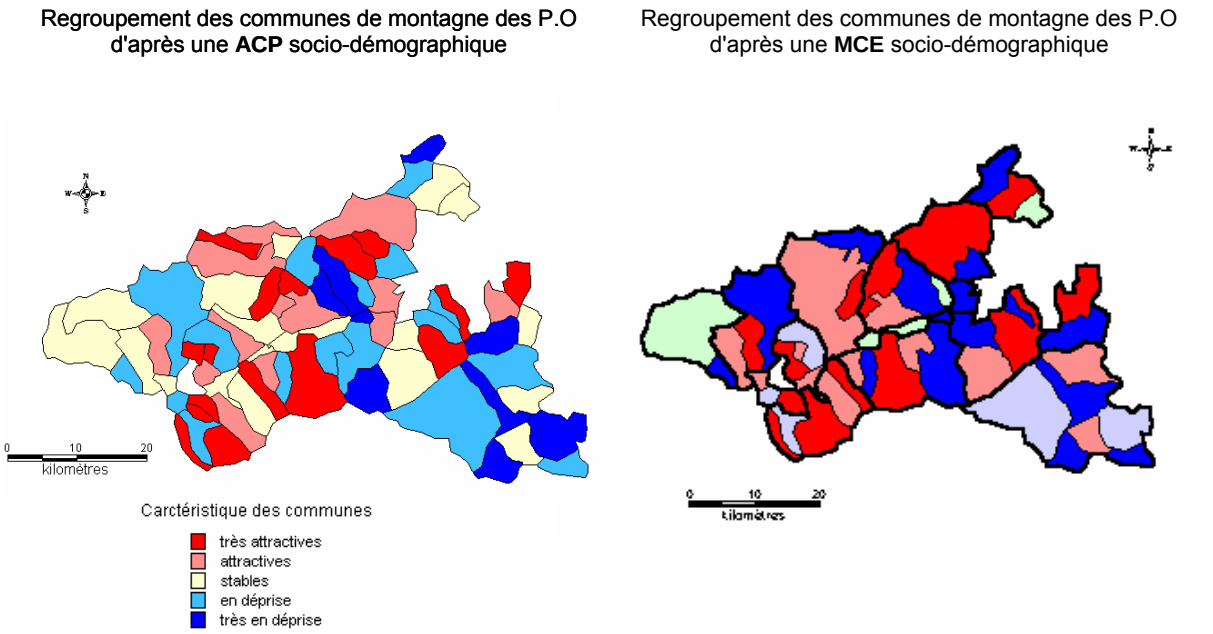


Fig. 41 : Comparaison des résultats d'une analyse sociodémographique par ACP et EMC des communes de montagne des Pyrénées Orientales. *Source : Dos Santos et Frat, 2002*

Sans vouloir anticiper sur la partie II, j'ai tenté, depuis le milieu des années 1990 de contribuer à une réflexion portant sur la chaîne des traitements dans les applications géomatiques (Camacho Olmedo et Paegelow, 1995) ainsi que sur les avantages du mode conceptuel raster (Camacho Olmedo et Paegelow, 1997).
Parallèlement, les années 1990 ont été marquées par la redéfinition de certains métiers suite à l'informatisation de leur environnement de travail, voire des données utilisées. En particulier, le métier du cartographe a sensiblement évolué. J'ai pu impulser un certain nombre de travaux portant à la fois sur la mutation de cette profession mais aussi la persistance de sa spécificité (Lafage, 2001 ; Prats, 2003). Toutefois, l'un des aspects les plus novateurs exploré depuis la fin des années 1990, est la cartographie interactive sur le Web. Au lieu de présenter des cartes fixes en mode image, souvent longues à charger même dans un format entrelacé, de nombreux sites Internet proposent désormais une cartographie vectorielle paramétrable en ligne par l'utilisateur. Ce type d'applications se généralise aussi bien dans le domaine des cartothèques que dans le secteur du tourisme. Nous avons accompagné la mise en place d'un site Web présentant une cartographie interactive des différentes couches d'information relatives à la protection du littoral dans le cadre de l'accord RAMOGE[8]. Signé en 1976 entre les gouvernements français, monégasque et italien, cet accord vise l'harmonisation des moyens de prévention et de lutte contre la pollution marine dans les zones maritimes de Provence-Alpes-Côte d'Azur, de la Principauté de Monaco et de la région Ligurie (RAMOGE, 2004). Programmé en SVG (Scalable Vector Graphics), ce site permet le choix des couches d'information visualisées et de l'échelle et propose, à grande échelle, une navigation géographique (fig. 42).

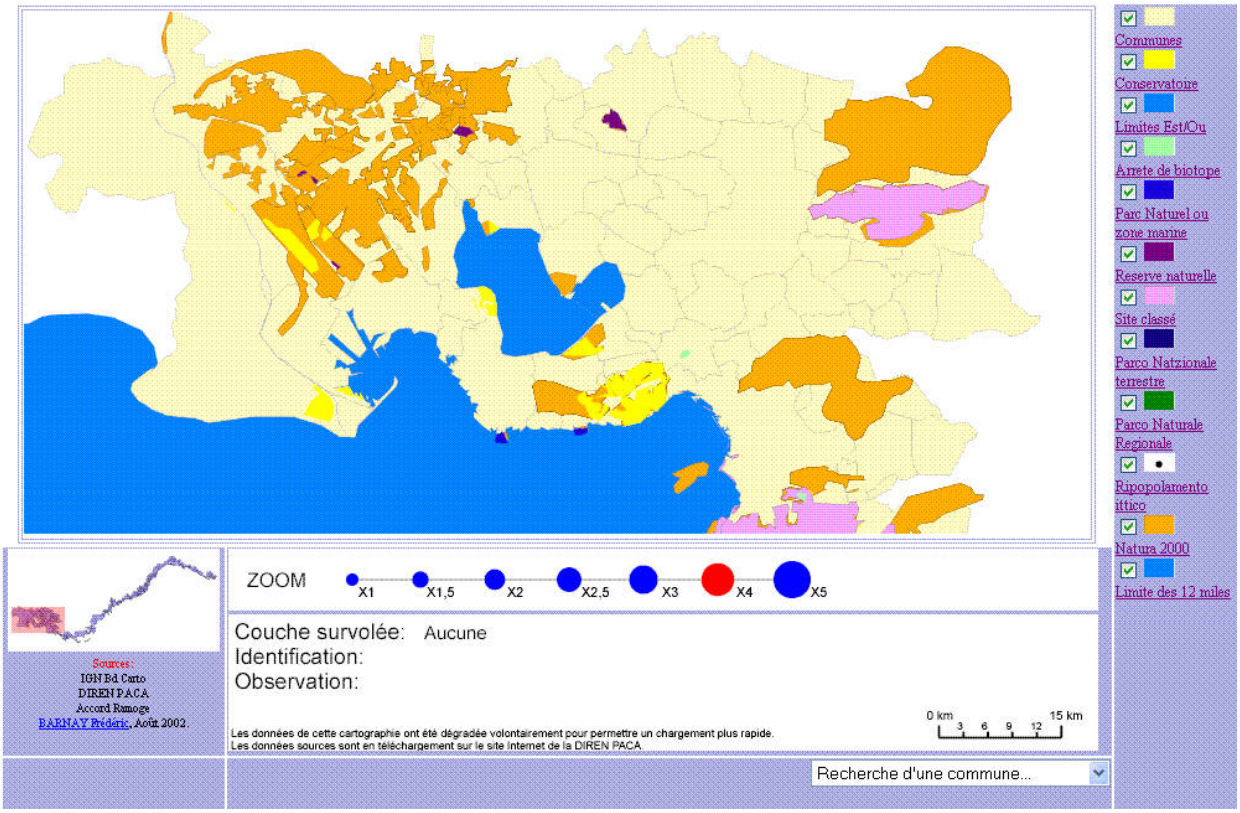


Fig. 42 : Cartographie interactive sur le Web. L'exemple RAMOGE. *Source : Barnay, 2002*

[8] Acronyme de Saint-Raphaël, Monaco, Gênes.

C'est dans une perspective analogue que je me suis attaché à valoriser les recherches géographiques en environnement menées au Département de Géographie et Aménagement au niveau de la maîtrise. Gautier (2002) a réalisé un site Internet, prochainement intégré dans celui de notre laboratoire, recensant toutes les productions graphiques contenues dans les mémoires de géographie, spécialité environnement, soutenues entre 1995 et 2001. Elle propose une recherche par auteur, par thème et par entrée géographique (fig. 43). Les documents sont positionnés sous forme de pictogrammes sur des fonds cartographiques et pourvus d'une fiche de méta-données.

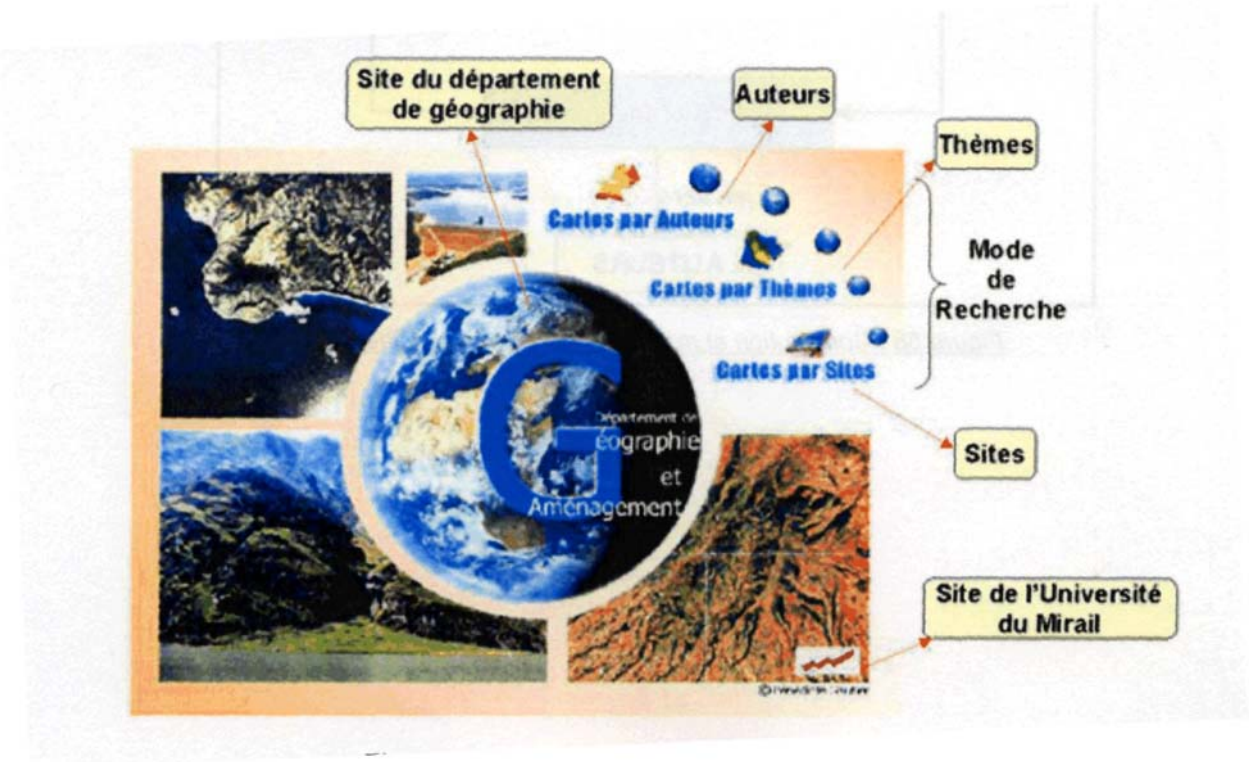


Fig. 43 : Site Internet valorisant les productions (carto-)graphiques issues des maîtrises de géographie, spécialité environnement. *Source : Gautier, 2002*

Enfin, toujours sur le plan méthodologique, je suis actuellement engagé dans un travail de couplage de SGBD, par lien dynamique, à un SIG vectoriel mais simulant l'approche raster. Telle est la démarche utilisée à l'occasion des recherches portant sur une simulation climatique, en collaboration avec le Centre de Biogéographie-Ecologie FRE 2545 CNRS dans le cadre d'un programme PEVS-CNRS (2001-2003). L'objectif est de simuler les conséquences d'une augmentation générale des températures, liée au réchauffement global, sur le couvert végétal et notamment sur les réserves hydriques du sol. Nombre de paramètres doivent être calculés à haute résolution spatiale et temporelle. Pour cela, nous utilisons une matrice de *pseudo-pixels* (polygones vectoriels épousant la forme carrée des pixels et simulant une matrice raster, cf. fig. 44). Notre attention se porte notamment sur l'articulation entre SGBD et SIG et sur la mémorisation des résultats intermédiaires afin de réduire les temps de calcul.
Blois et al. (2004) ont appliqué cette démarche à la Montagne de Lure (Haute Provence), en concevant une base de données sous Access dont les principaux paramètres (cf. fig. 45) du modèle sont ajustables par l'utilisateur.

L'ensemble de nos recherches dans le domaine de la simulation climatique en est encore à ses débuts[9] et leur prolongement sera exposé dans la partie III.

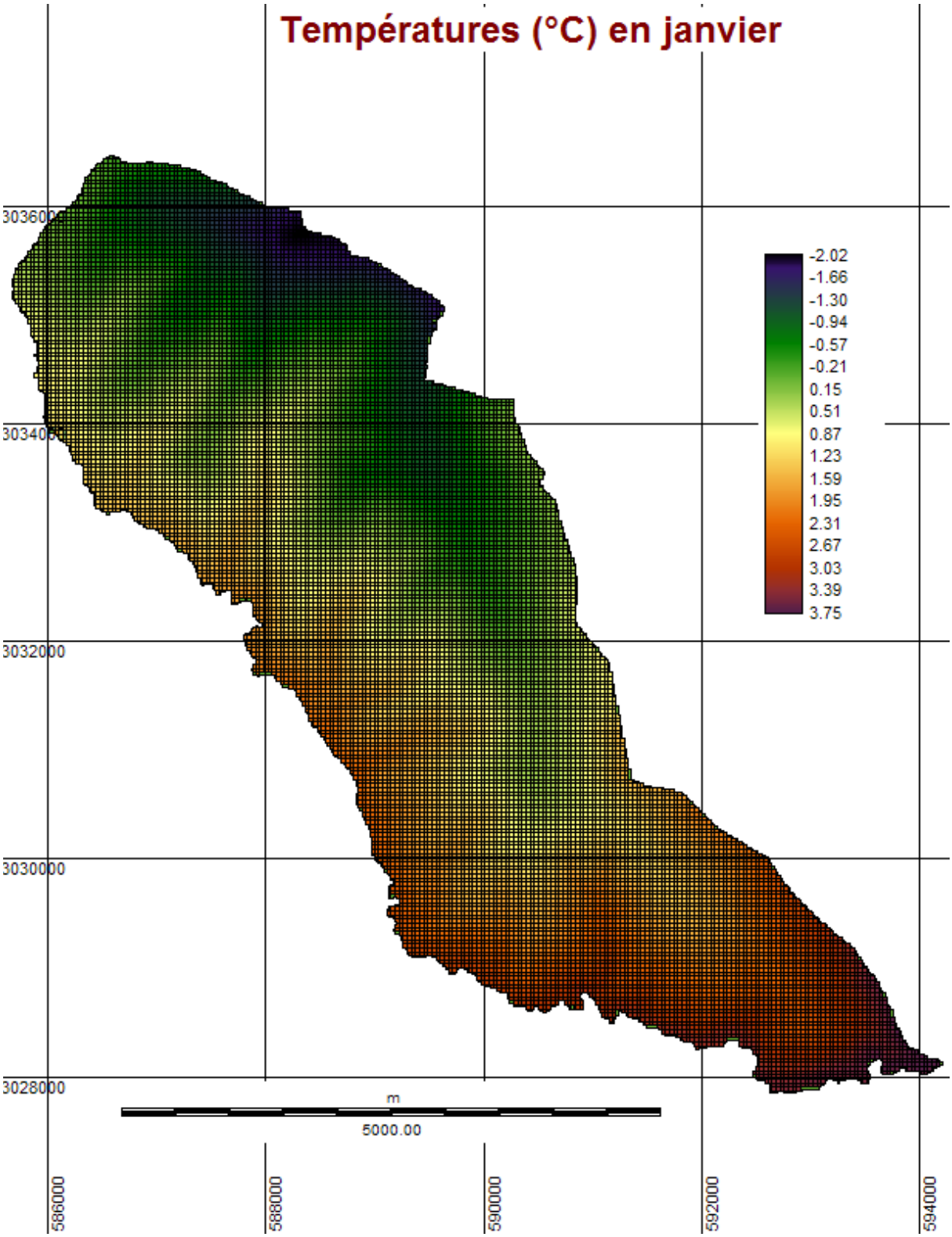


Fig. 44 : Températures simulées de janvier sur la soulane des Garrotxes (66). Carte en *pseudo-pixels*

[9] Une publication avec Pierre Pech, Laurent Simon et Martine Tabaud est en préparation.

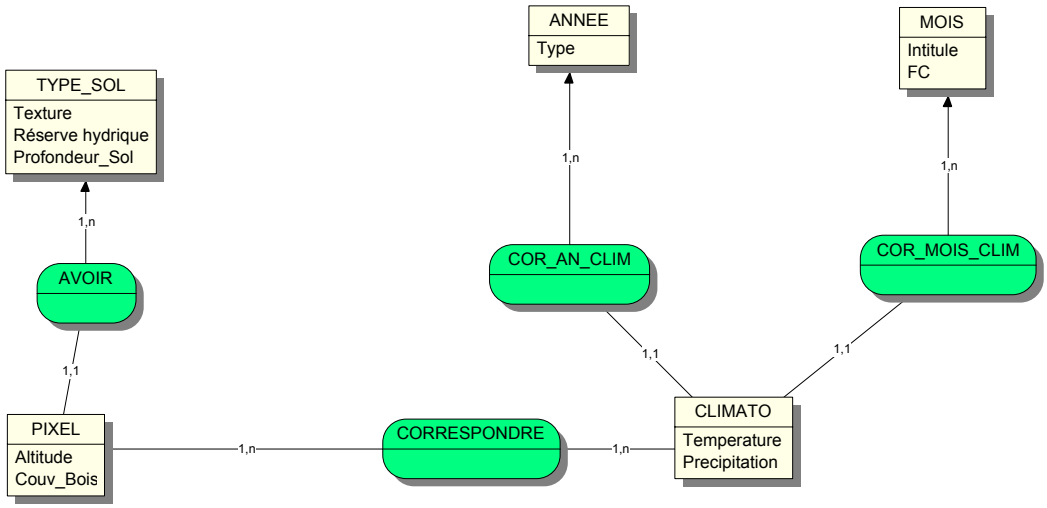


Fig. 45 : MCD pour la simulation climatique appliquée à la Montagne de Lure (Haute Provence). *Source : Blois et al., 2004*

Analyses spatio-temporelles de dynamiques environnementales

Dès l'achèvement de mes recherches doctorales – et parallèlement aux travaux mentionnés ci-dessus – je me suis intéressé aux études diachroniques appliquées aux anthroposystèmes montagnards, notamment celles de l'occupation du sol. L'étude de l'environnement est un axe majeur du GEODE, aussi bien sur le temps long (histoire de l'anthropisation des milieux) que sur le temps court (de quelques dizaines d'années à deux centenaires – des laps de temps correspondant à une couverture par des données spatialisées à haute résolution comme le cadastre et les photographies aériennes). Son application aux milieux montagnards a également une longue tradition motivée par un ensemble de faits : d'une part, il s'agit de milieux longtemps délaissés par la recherche qui s'est focalisée, plutôt, sur des zones à fort impact économique. D'autre part, il s'agit de milieux ayant une forte spécificité, qui n'est pas seulement physico-géographique, même si l'étagement et la palpable interaction de facteurs naturels et socio-économiques y sont particulièrement visibles. Cette spécificité repose sur l'action combinatoire du milieu physique, de l'identité culturelle et de son histoire récente marquée par un exode rural et une diminution drastique de la pression anthropique sur le milieu, conduisant à une fermeture paysagère sans précédent et à des taux de boisement les plus élevés depuis quatre siècles. A cela s'ajoute, enfin, la lisibilité exemplaire de l'action de l'Homme sur le milieu et le nombre restreint de facteurs à considérer afin de pouvoir expliquer l'évolution des activités humaines et leur matérialisation paysagère qui est l'occupation du sol.

On peut considérer l'occupation du sol comme un marqueur des activités que l'Homme déploie dans l'espace et auquel elle réagit avec une certaine inertie[10]. Ce rôle d'indicateur joué par l'occupation du sol est d'ailleurs le point de départ de vastes programmes internationaux comme LUCC (Land Use and Land Cover Change), élément de recherche des programmes IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) et IHDP (International Human Dimensions Program on Global Environmental Change) (LUCC, 2004). L'étude de son évolution et la caractérisation des dynamiques choisies reposent sur les deux outils classiques des SIG : le croisement de plans et la requête attributaire.

Outre cette facilité d'application des SIG ou, plutôt, son rapport très positif entre investissement en temps et gain en connaissance, cette thématique se prête à une réflexion d'ordre plus méthodologique quant à son caractère spatio-temporel. Les outils géomatiques du milieu des années 1990 avaient déjà bien instrumentalisés les techniques d'approche du spatial, qu'il s'agisse du géoréférencement, de la correction géométrique ou encore de l'interpolation spatiale. Il était loin d'en être de même pour le volet temporel : comment appréhender et décrire une évolution (si évolution y a) dans le temps ? Si on sait représenter l'espace et interpoler entre deux mesures ponctuelles, nous n'en sommes qu'au début quant à la résolution de la même problématique appliqué au cadre temporel. Déjà, la simple représentation de la dimension temporelle nous pose problème. Est-elle simplement unidimensionnelle et directionnelle (l'image de la flèche du temps) ? Comment interpoler entre deux dates (l'équivalent de nos points de mesure dans un espace que nous concevons naturellement multidimensionnel) sachant que des phénomènes comme l'occupation du sol et la couverture végétale n'évoluent guère de manière linéaire au sein de systèmes complexes et ouverts ?

Ces réflexions étaient également stimulées par les réunions successives, au sein du GEODE, quant à l'orientation que nous voulions donner aux journées du programme Environnement, Vie et Sociétés (PIREVS) du CNRS qui se sont tenues en 1997 à Toulouse et que notre laboratoire était chargé d'organiser. Le choix s'est finalement porté sur le thème du temps et de son approche dans les sciences de l'environnement.

Mon intérêt pour la problématique de l'approche spatio-temporelle des dynamiques environnementales est d'ailleurs à l'origine des recherches en modélisation prospective, exposées dans la partie II, et s'est concrétisé dans divers programmes de recherches du CNRS.

Au début de ma carrière de chercheur, j'ai participé sur ces thématiques à l'encadrement de travaux universitaires appliqués à divers terrains d'études des Pyrénées ariégeoises (Etienne, 1994) et haut-garonnaises (Ruis, 1996 ; Schneider, 1996). Parallèlement, je commençais à étudier un petit massif enclavé et touché par la déprise agricole au point qu'il n'existe plus aujourd'hui une seule parcelle destinée aux cultures annuelles commercialisées : Les Garrotxes, sous-ensemble du massif de Madrès-Coronat, situées dans le Haut-Conflent, Pyrénées-Orientales (fig. 46).

La phase d'acquisition des données (cadastre napoléonien, photo-interprétation, digitalisation) s'est révélée relativement lourde. Peu de données existaient en numérique il y a dix ans et les logiciels SIG utilisés étaient encore peu fiables comme on l'a rappelé antérieurement. Les premiers résultats sont consignés dans des travaux d'étudiants (Moles, 1994 ; Beltrami, 1996) et dans les Actes des Journées du PIREVS « Les Temps de l'Environnement » (Paegelow et Camacho Olmedo, 1997). Des recherches plus approfondies et l'actualisation des connaissances (Le Mouël, 2001 ; Doukhan, 2003) ont également alimenté une analyse plus fine des dynamiques environnementales, dans la perspective d'une comparaison avec un site d'études andalou situé sur le versant méridional de la Sierra Nevada : l'Alta Alpujarra

[10] On reviendra sur cette notion dans la partie II.

Granadina (Paegelow et Camacho Olmedo, 2003). Ce sont les connaissances de la dynamique de l'occupation du sol accumulées sur les deux sites que nous avons naturellement utilisées pour appliquer notre approche modélisatrice (partie II).

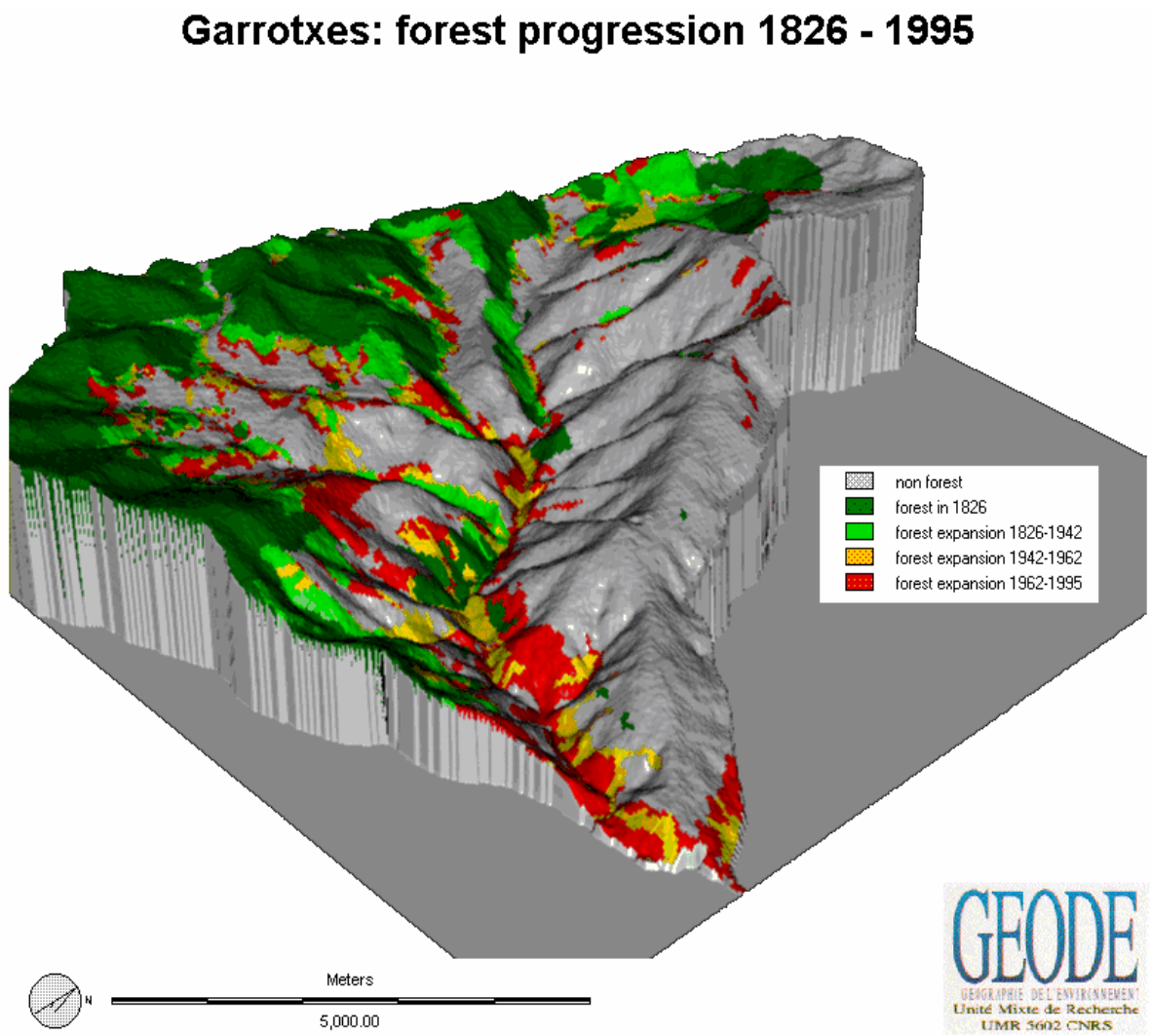


Fig. 46 : Reboisement quasi exclusivement spontané dans les Garrotxes (66) entre 1826 et 1995

Parallèlement, nous avons placé nos recherches propres, déployées au cœur du massif du Madrès-Coronat, dans un contexte géographique plus large :

- L'est pyrénéen (Métailié et Paegelow, 2000, 2004) – une comparaison des dynamiques de recolonisation du milieu par la forêt.
- Le périmètre du futur Parc Naturel Régional des Pyrénées Catalanes (Parage, en cours) – acquisition d'une base de données de la couverture végétale.
- Le département des Pyrénées Orientales (Blanc, 2001): étude historique de l'occupation du sol de 1820 à nos jours sur la base de données cadastrales (fig. 47).
- L'espace transfrontalier des espaces pastoraux (programme franco-espagnol Interreg 3A, 2003-2006, en cours).

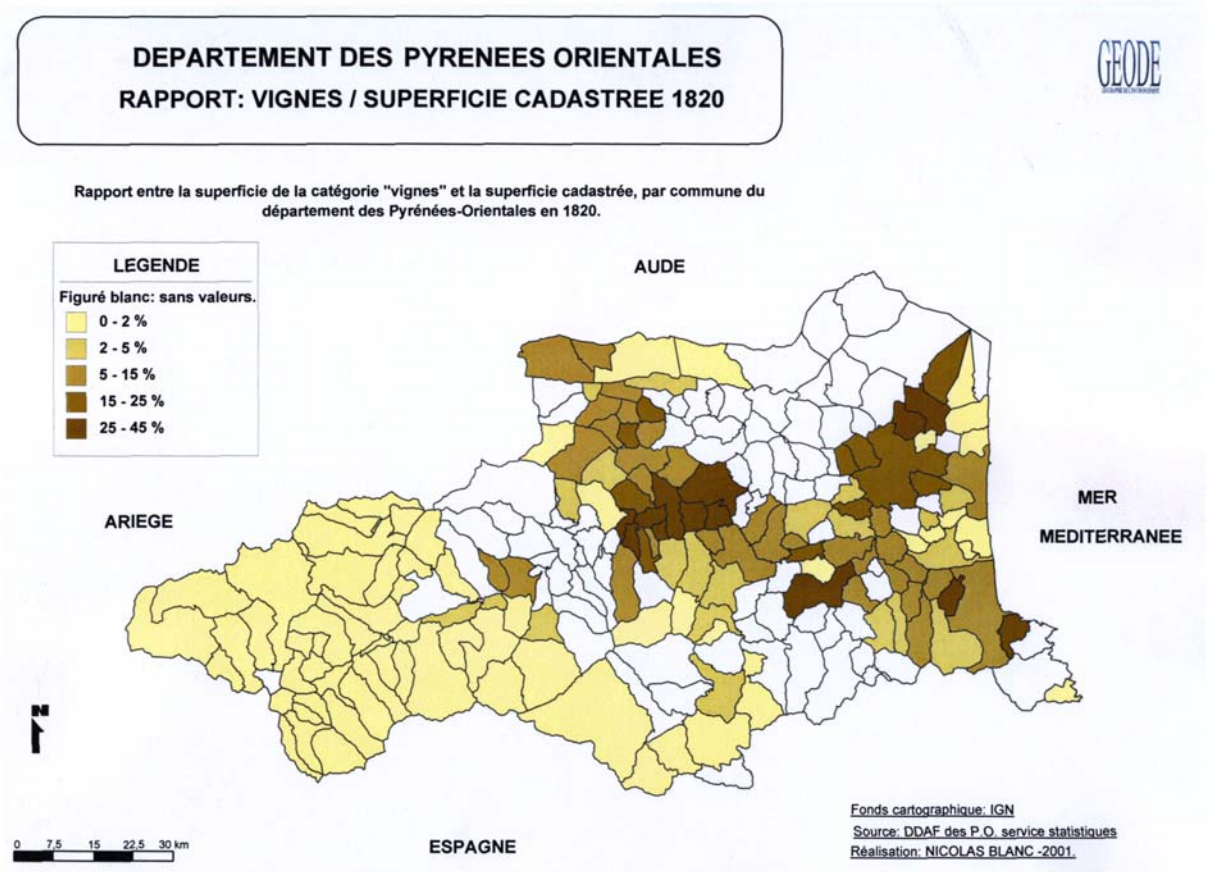


Fig. 47 : Etude historique de l'occupation du sol dans le département des Pyrénées Orientales à base de données cadastrales. *Source : Blanc, 2001*

Cet élargissement géographique s'accompagne aussi d'un approfondissement et d'une actualisation des bases de données : ajout de nouvelles dates et de nouveaux attributs,suivi régulier de parcelles-test pour une étude très fine de la dynamique végétale (cf. fig. 48), conception de nomenclatures emboîtées à plusieurs échelles, numérisation et orthorectification des clichés et nouvelle interprétation de la couverture forestière dans une logique semi-quantitative à grande échelle (Doukhan, 2003 ; Gaviano, 2004 ; Gomes Zotano, 2004). Ce travail extrêmement « chronophage » repose, en grande partie, sur des travaux d'étudiants dont nous avons dirigé les recherches de maîtrise ou de stage. Il constitue une étape indispensable pour optimiser le modèle de simulation prospective de l'occupation du sol, présenté dans la partie II.

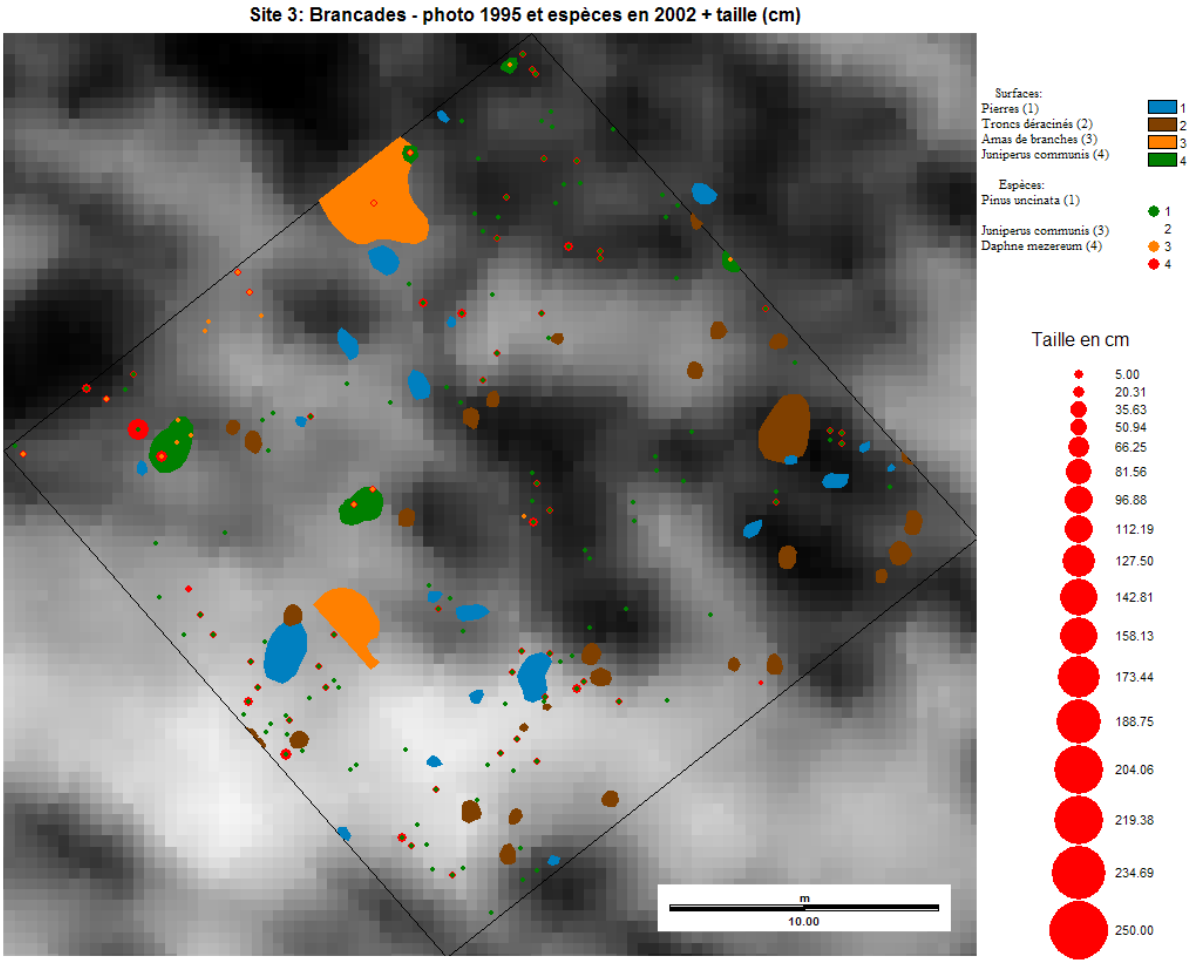
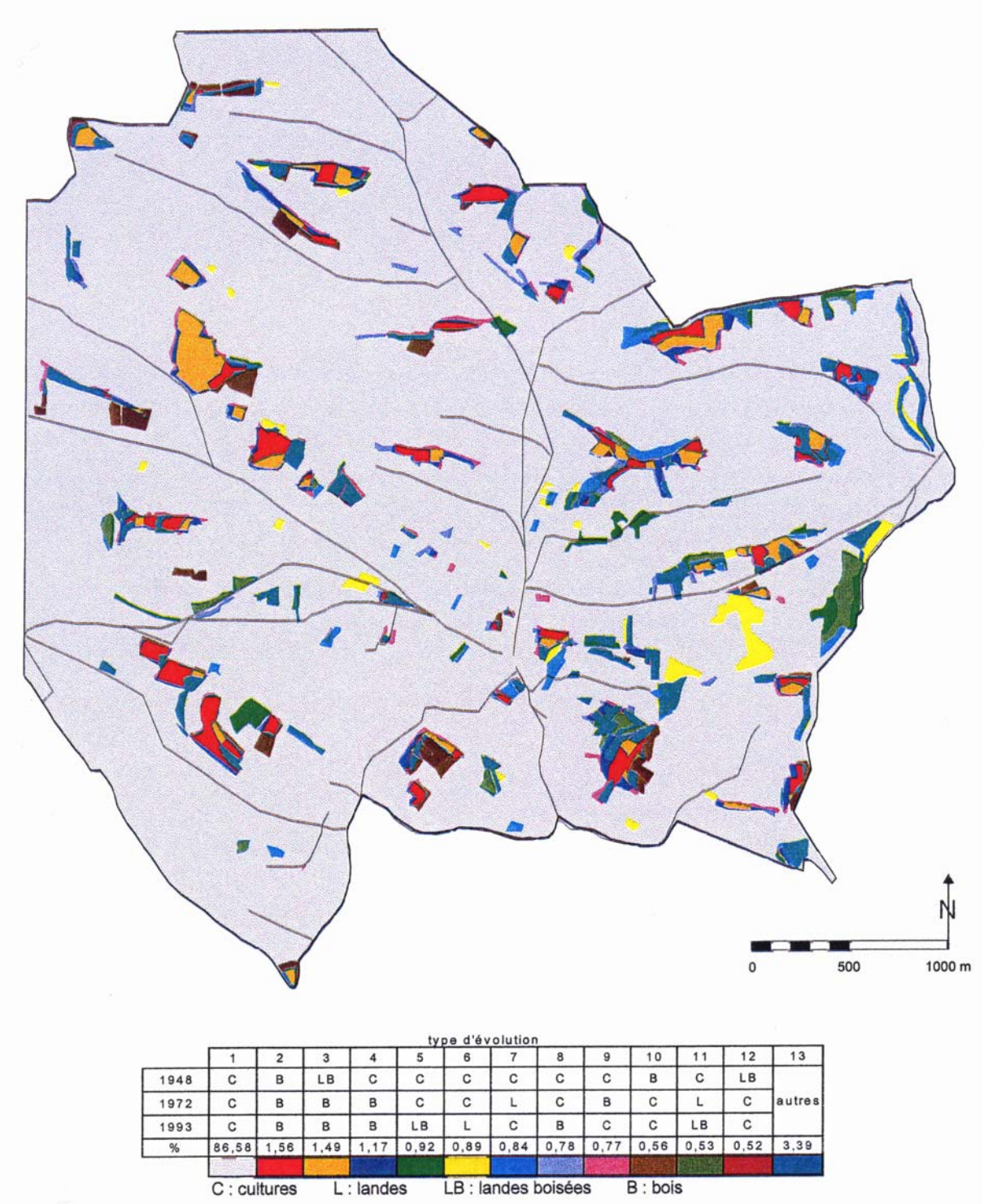


Fig. 48 : Suivi 2002 de la zone test dite « Les Brancades », Garrotxes (66) : sur fond de photographie aérienne panchromatique de 1995, cartographie des individus arbustifs ou arborescents (espèce et taille)

A côté des applications à l'environnement pyrénéen et andalou, l'ordinaire de la géomatique (acquisition, géoréférencement, correction géométrique, renseignement de base de données attributaires, croisement de plans d'informations, …) a été aussi déployé pour l'étude spatio-temporelle d'autres environnements, notamment :

- L'étude diachronique de la biodiversité dans le Lauragais – études d'évolution de l'occupation du sol (Schwal, 1999 – fig. 49) et des haies (Guiavarc'h, 2002 – fig. 50), comparées à celle de la diversité floristique.
- L'évolution morphologique et morphométrique des réseaux hydrographiques en milieu polaire (Roussel, 2004- fig. 51), reposant sur un travail de correction géométrique de photographies aériennes très minutieux (fig. 52).

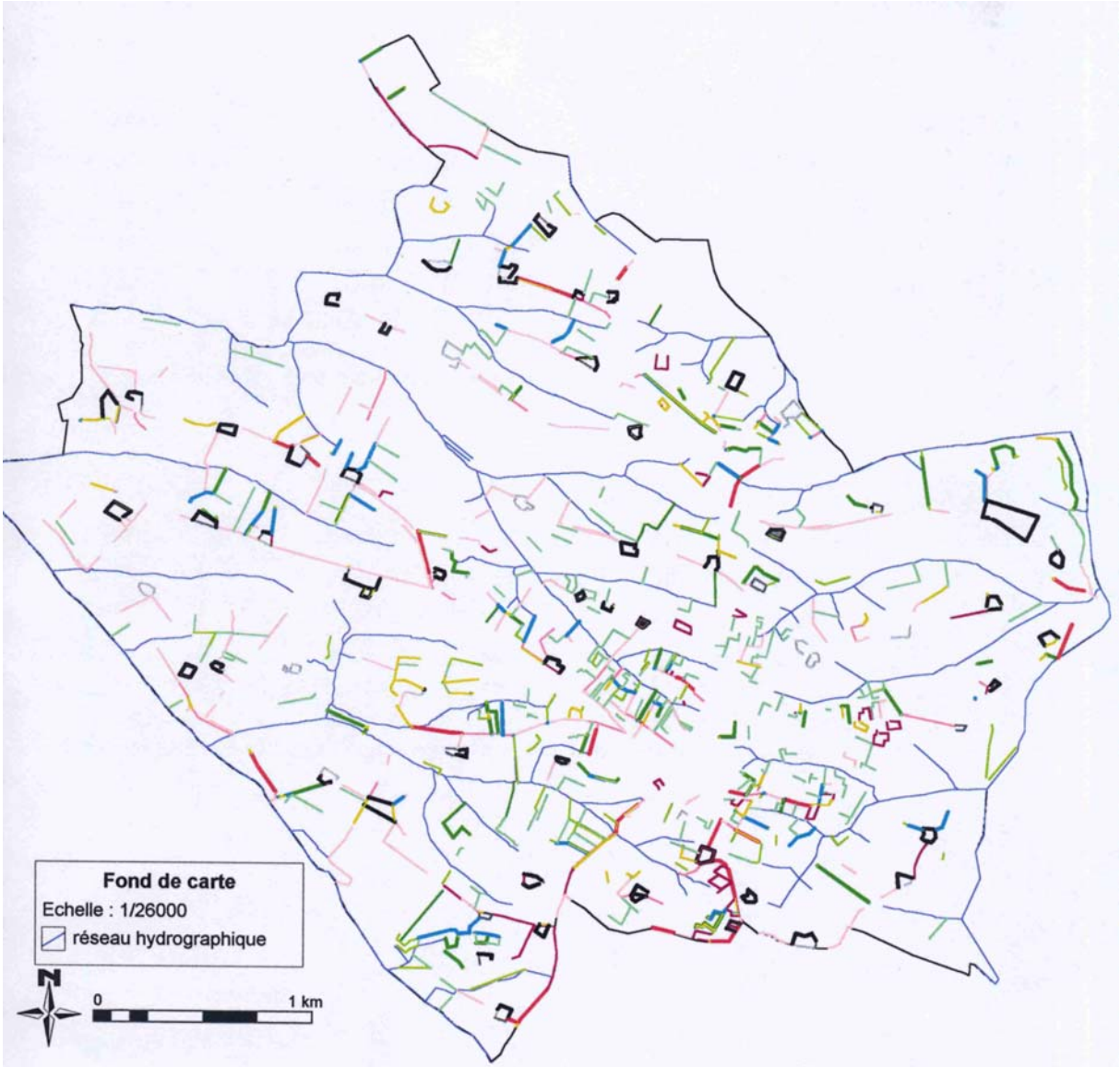


type d'évolution

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1948	C	B	LB	C	C	C	C	C	C	B	C	LB	
1972	C	B	B	B	C	C	L	C	B	C	L	C	autres
1993	C	B	B	B	LB	L	C	B	C	C	LB	C	
%	86,58	1,56	1,49	1,17	0,92	0,89	0,84	0,78	0,77	0,56	0,53	0,52	3,39

C : cultures L : landes LB : landes boisées B : bois

Fig. 49 : Evolution de l'occupation du sol à Nailloux (Lauragais haut-garonnais) entre 1948, 1972 et 1993. *Source : Schwal, 1999*



														Divers
1946-1948	BR	IC	HAB	IC	IC	-	BR	BR	BR	HAB	-	HAB	-	
1970-1972	-	-	HAB	IC	IC	-	IC	BR	BR	-	-	HAB	-	
1993	-	-	HAB	-	IC	HAB	IC	BR	-	-	-	-	-	
2002			HAB		IC	HAB	IC	BR			BR		IC	
%	19,7	18,5	9,86	7,4	7,3	7,2	5,7	5,6	4,8	3,64	2,5	2,32	1,5	4,16

Fig. 50 : Evolution des haies à Nailloux (Lauragais haut-garonnais) entre la fin des années 1940, le début des années 1970, 1993 et 2002 (IC – haie sur un interchamp, BR – haie en bord de route ou chemin, HAB – haie en bord de bâtiment). *Source : Guiavarc'h, 2002*

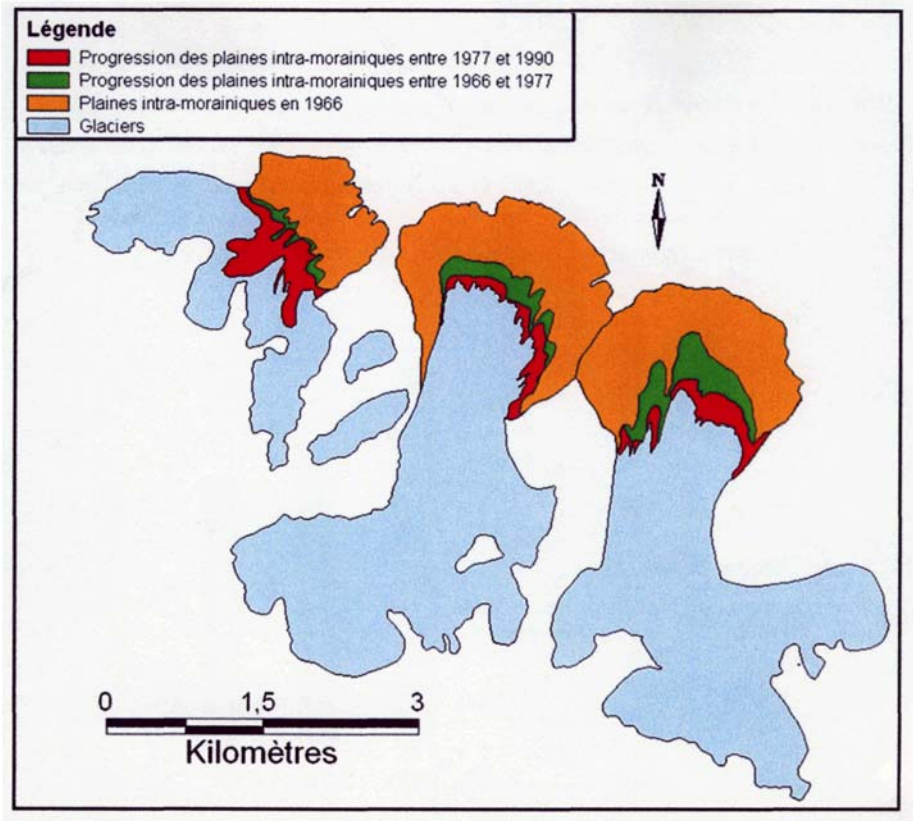


Fig. 51 : Progression des plaines intra-morainiques en presqu'île de Brøgger, Spitsberg, entre 1966, 1977 et 1990. *Source : Roussel, 2004*

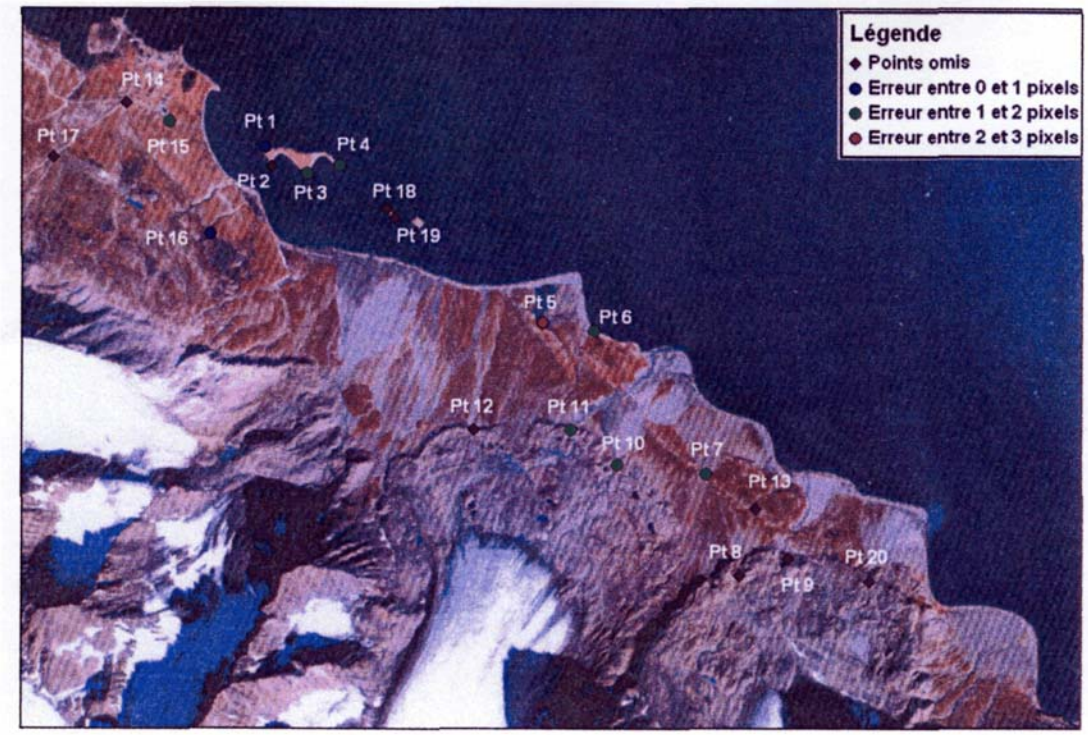


Fig. 52 : Correction géométrique des photographies aériennes avec cartographie des résidus appliquées ici à la mission de 1990 (presqu'île de Brøgger, Spitsberg). *Source : Roussel, 2004*

A cet éventail s'ajoutent des recherches en cours portant sur des problématiques voisines, dans des environnements géographiques variés :

- Le changement de l'occupation du sol et des formes de production dans la zone maraîchère périurbaine de La Havane (fig. 53) et, plus généralement, les transformations de l'espace agricole dans l'ouest de l'île (notamment la reconversion des immenses espaces jadis réservés à la culture de la canne à sucre). En collaboration avec les universités de La Havane et de Pinar del Río et supportés par le programme des relations internationales du CNRS, ces deux lignes de recherche, en cours, sont cependant exposées à l'aléa des relations politiques. Ainsi, les autorités cubaines ont cessé la coopération scientifique avec les organismes de recherche étatiques de l'Union Européenne, depuis le printemps 2003.

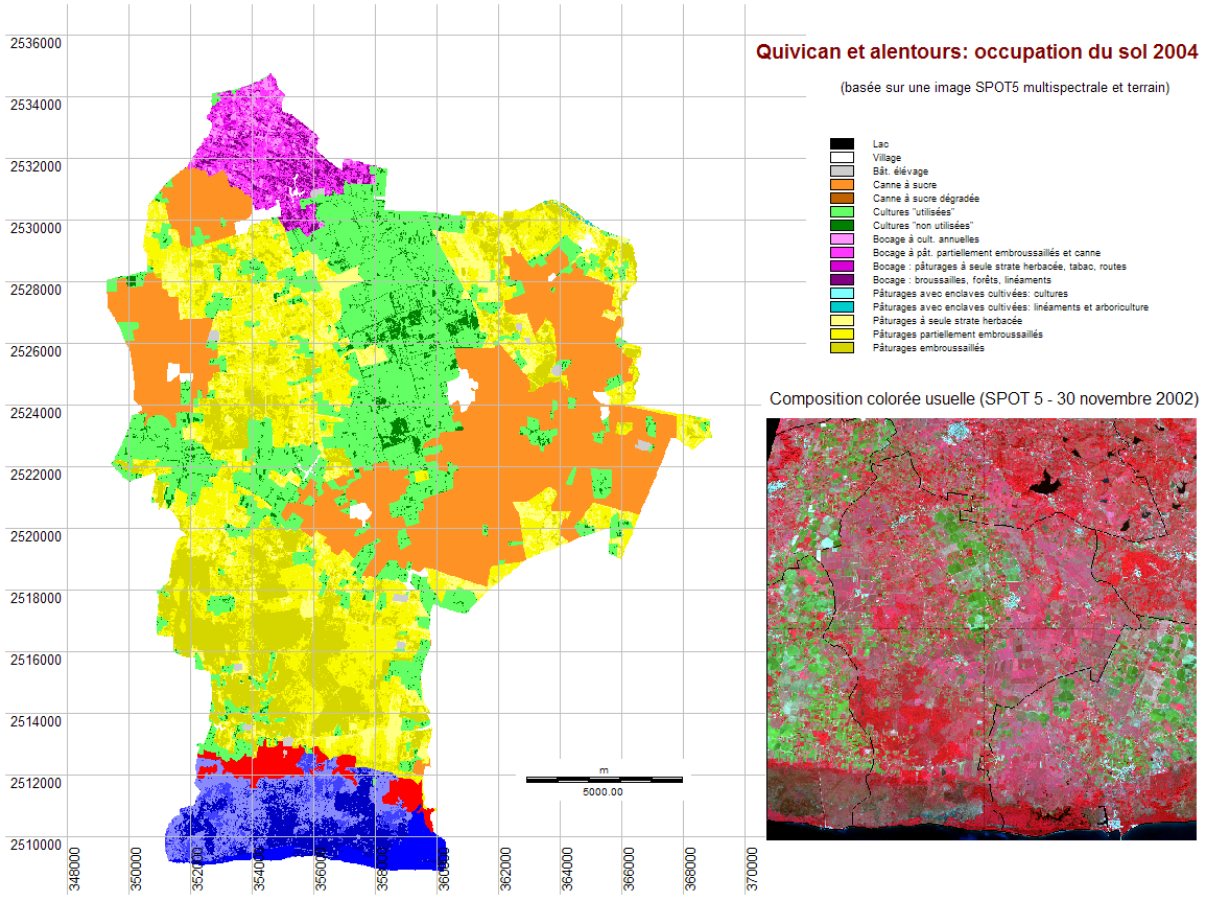


Fig. 53 : Occupation du sol en 2004 dans le municipio de Quivican (30 km au sud de La Havane). Cartographie réalisée à partir de l'interprétation d'une image SPOT 5 multispectrale du 30 novembre 2002 et de recherches sur le terrain en janvier 2004.

- L'évolution du vignoble andalou. S'appuyant sur un programme de recherche visant à étudier l'évolution d'anciens petits vignobles dans le sud-ouest de la France (phénomène de la contraction des anciennes vignes paysannes, très répandues, et leur restructuration sous forme de petits vignobles de qualité très localisés) (cf. les travaux de J.C. Tulet, notamment Pech et Tulet, 2002), nous avons entamé l'étude de la dynamique récente du vignoble andalou. Les premiers résultats (Camacho Olmedo et al., 2004) illustrent une évolution du vignoble comparable, quoique plus récente, à celle observée dans le sud-ouest français : une concentration drastique du

vignoble sur quelques pôles de qualité (fig. 54). Ce phénomène de restructuration et de recréation de vignes est, depuis seulement quelques années, en train de redynamiser des espaces montagnards, longtemps délaissés au profit des cultures maraîchères sous serre, très développées sur le cordon littoral. J'ai soumis au printemps 2004 un programme de recherche PICASSO ayant pour objectif une analyse plus approfondie de ces dynamiques dans la Contraviesa, montagne andalouse littorale de la cordillère bétique.
Signalons également la constitution d'un SIG de l'évolution du vignoble de Cahors (Lot) à échelle cadastrale dans deux communes pilotes (Levoyer et Fall, 2004).

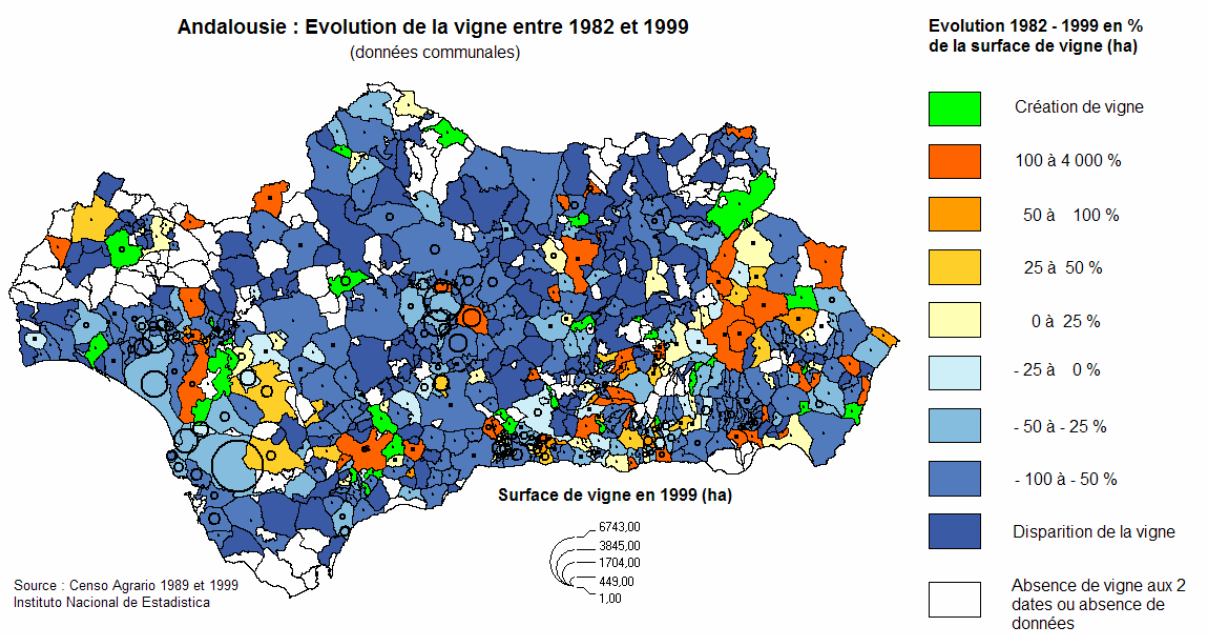


Fig. 54 : Evolution de la vigne andalouse entre 1982 et 1999. *Source : Camacho Olmedo et al., 2004*

La constitution d'un réseau de recherche

Les travaux entamés sur le site du massif du Madrès-Coronat sont liés à l'établissement d'une coopération scientifique régulière avec les membres de l'Instituto de Desarrollo Regional (IDR) de l'Université de Granada (Espagne) – un laboratoire de recherche pluridisciplinaire employant des approches scientifiques très semblables aux nôtres et travaillant sur les mêmes problématiques environnementales et paysagères. Cette coopération a débuté grâce à des projets de courte durée ne finançant que les séjours (Action Intégrée 1993-1994 et PICS 1995-1996). Elle s'est considérablement intensifiée dans le cadre de projets de recherche du CNRS (PICS – 1999 à 2000 et PEVS – 2000 à 2001 et 2001 à 2003) et du CICYT (Centro de Investigacíon Científica y Technológica) espagnol (2004-2006).
L'objectif était, dans un premier temps, d'obtenir des bases de données géoréférencées sur deux sites comparables et d'harmoniser les chaînes de traitements tout en nous orientant vers des problématiques de modélisation.
Ce travail, amorcé en 1994, a débouché sur une coopération scientifique continue, enrichie depuis 2000 par les compétences du Centre de Biogéographie-Ecologie FRE 2545 CNRS et

du GRIMM (Groupement de Recherche en Informatique et Mathématiques du Mirail), EA 3686 Université de Toulouse – Le Mirail.
D'autres coopérations scientifiques sont en cours de constitution :

- Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Unidad Académica Morelia
- Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná CEFET-PR), Brésil
- Geographisches Institut der Universität Hannover, Allemagne

3.5. Vers une pédagogie active de la géomatique en géographie

L'enseignement et la recherche vont de pair et se nourrissent l'un l'autre. Cette affirmation, aussi banale soit-elle, occupe néanmoins une place centrale dans ma réflexion professionnelle d'enseignant-chercheur. Au tout début de ma carrière, en 1992, l'enseignement des outils numériques en géographie (optionnel en grande partie) abordait déjà l'usage d'applications bureautiques (traitement de texte et tableur) et assurait une formation initiale dans les domaines de la conception cartographique assistée par ordinateur (CCAO) et du traitement d'image satellitale. L'esprit d'ouverture du Département de Géographie et Aménagement de notre université à l'égard de ce que l'on nommait alors les « nouvelles technologies », lui a assuré un temps d'avance sur la plupart des autres Départements (ou UFR) de géographie français.

Vers une filière d'enseignements techniques

La généralisation, l'approfondissement et la coordination des enseignements techniques s'est faite notamment lors des réformes successives des diplômes : des unités de valeur (UV) aux modules en 1995 et aux unités d'enseignements (UE) en 1999.
Depuis 1998, mon rôle d'enseignant s'est étendu à la coordination des enseignements techniques de la première à la troisième année. Il s'agissait, avant tout, de moderniser les enseignements et de les imbriquer les uns aux autres afin de garantir une véritable progression pédagogique. Comme toute tâche pédagogique, ce rôle implique une action continue et de remise en question périodique.
Cependant, cette « filière » technique s'arrêtait au niveau de la maîtrise. Le manque d'enseignements et le brassage des étudiants locaux avec ceux arrivant d'autres universités – dont les effets sont par ailleurs très positifs – ne permettent guère de considérer les enseignements dispensés au cours des six premiers semestres comme une assise solide. Il en va de même pour les différents DEA attirant un public très hétérogène quant à son niveau géomatique acquis en formation initiale. La réorientation pédagogique dans le cadre de l'harmonisation européenne, dite « LMD », devrait, peut-être, atténuer certains de ces effets négatifs

Création du DESS SIGMA

Depuis fin 1997, j'étais en contact avec Patrick Bergougnoux, alors maître de conférences à l'UFR d'Informatique de l'Université Toulouse I. Nous déplorions tous les deux le manque de formations professionnalisantes en géomatique de niveau troisième cycle dans la région toulousaine.
Des premiers contacts et des premières esquisses – en passant par les dossiers d'habilitation – jusqu'à l'ouverture de la formation, deux ans et demi devaient s'écouler. Le DESS SIGMA (Science de l'Information Géoréférencée pour la Maîtrise de l'environnement et l'Aménagement des territoires) accueille sa première promotion en septembre 2000.
L'idée fondatrice était de créer une formation associant étroitement la géographie et l'informatique. Cet esprit, littéralement géomatique, répondait simplement à une analyse de l'adéquation des formations disciplinaires (géographie, agronomie, informatique, …) dispensant des enseignements géomatiques avec les exigences formulées dans les offres d'emploi. Pour caricaturer, on peut résumer la situation comme suit : tandis que les « thématiciens » manquent d'une connaissance suffisante en informatique (algorithmique, programmation, théorie des bases de données, …), les informaticiens pêchent par une connaissance insuffisante de la signification des données qu'ils traitent.
Ce constat fut le fil conducteur suivi lors de la conception des contenus pédagogiques de la formation. Pour cela, nous avons puisé dans les compétences présentes dans la métropole régionale qu'est Toulouse, sans nous laisser enfermer pour autant dans une logique institutionnelle. Le résultat est une formation multisceau et pluridisciplinaire aussi bien sur le plan de la composition de l'équipe pédagogique que sur celui des étudiants (DESS SIGMA, 2004 ; DESS SIGMA site des étudiants, 2004).

Vers un enseignement à distance multimédia

L'Université de Toulouse – Le Mirail a la particularité de dispenser des parcours pédagogiques entiers, diplômants, aux étudiants à distance. Le service d'enseignement à distance (SED) est, de loin, le plus important de ceux proposés par les universités françaises. L'enseignement à distance est assuré par l'envoi de cours et d'exercices sur support papier noir et blanc. Ces fameux polycopiés se prêtent mal à l'enseignement de la géomatique et de ses bases que sont la cartographie, la lecture et l'interprétation de photographies aériennes ou encore la maîtrise des systèmes d'exploitation et des applications dites bureautiques. Les contacts entre enseignants et étudiants se résumaient, dans la plupart des cas, à l'examen. Peu d'étudiants cherchaient un contact personnel par lettre et les regroupements pédagogiques étaient exceptionnels.
L'informatisation croissante a fait changer la donne : le courrier électronique rapproche étudiants et enseignants et le support numérique (cours en ligne et envoi de CD-Rom) permet la diffusion du savoir et du savoir-faire en couleurs et sous une forme interactive qui ajoute à la progression linéaire de la lecture d'un texte, un apprentissage contextuel et connectif, autorisant de fait une progression pédagogique individualisée.
En charge de la coordination du SED au niveau du département de Géographie depuis 1999, je m'efforce d'adapter notre offre pédagogique aux moyens techniques actuels et à la demande sociale, sachant que le profil de l'étudiant à distance est en mutation. De plus en plus souvent, nous avons affaire à des personnes en situation de reprise d'études ou d'activité professionnelle. A cela s'ajoute la mobilité accrue des étudiants et la perception spatialement ubiquiste des savoirs. En 2004, entre 15 et 20 % des étudiants inscrits en DEUG et en Licence

de Géographie à Toulouse le sont par l'intermédiaire du SED. Bien que l'Université ne se donne pas encore les moyens pour répondre aux enjeux à moyen terme – notre réserve quant à l'implication dans des campus numériques, dont le nombre de créations se multiplie en France (Education Nationale, 2004), en est une illustration – nous proposons néanmoins aujourd'hui des cours en ligne (Barcet et al., 2002) et des cours multimédia dans le domaine de la géomatique (Paegelow et Vidal, 2004).

II. Modélisation, géomatique et simulation prospective de dynamiques environnementales

Si on considère l'ensemble des systèmes d'information géographiques, force est de constater que leurs fonctionnalités sont, dans la majorité des cas, utilisées pour des applications relativement « simples », correspondant aux fameux « cinq A » (acquérir, archiver, analyser, afficher, abstraire) des SIG. Pour la plupart des utilisateurs, localiser les données, géoréférencer et croiser les plans d'information, exécuter des requêtes attributaires et mettre en page les cartographies résultantes, sont autant d'opérations qui répondent le plus souvent aux besoins fondamentaux de gestion territoriale, en matière d'aménagement et d'environnement.

Il reste que les fonctionnalités permettent de mettre en œuvre des traitements complexes qui, à la dimension spatiale, combinent la dimension temporelle, notamment sous la forme de scénarios prospectifs simulés. Ces traitements complexes peuvent être regroupés sous l'appellation générale de modélisation. Cependant, encore en 1997, Le Berre et Brocard (1997) soulignent que les capacités des SIG sont largement sous-utilisées dans ce domaine.

En offrant ainsi la possibilité de simuler les dynamiques spatio-temporelles – et, pour ce qui nous concerne, les dynamiques environnementales –, en permettant la mise à l'épreuve des modèles (de les tester, comparer, critiquer), la géomatique ouvre la voie à des recherches riches de nombreuses virtualités, sur le plan fondamental ou appliqué.

Dans notre itinéraire de recherche, cette « entrée en modélisation » correspond finalement à un aboutissement logique, même si elle témoigne également d'un attrait indéniable, de notre part, pour les aspects théoriques et cognitifs des démarches de modélisation. Au cours de nos recherches sur les dynamiques environnementales, évoquées dans la partie I (chapitre 3, § 4), nous avions ressenti le besoin d'aller au-delà du constat (et de toutes les analyses qui s'y rattachent) de changements de catégorie d'occupation du territoire et de pénétrer un peu les ressorts de la dynamique spatio-temporelle environnementale, en explorant les possibilités de simulation – sinon de prédiction – offertes par la modélisation.

Avant même de présenter nos propres travaux de recherche, il nous a semblé impératif de résumer, dans un premier chapitre, les principales approches modélisatrices utilisables notamment en géographie de l'environnement. Dans les chapitres suivants, le modèle que nous avons mis au point est décrit, mis en œuvre, validé et confronté à des modèles alternatifs.

Chapitre 1. Aperçu des approches en modélisation et simulation prospective applicables en géographie de l'environnement

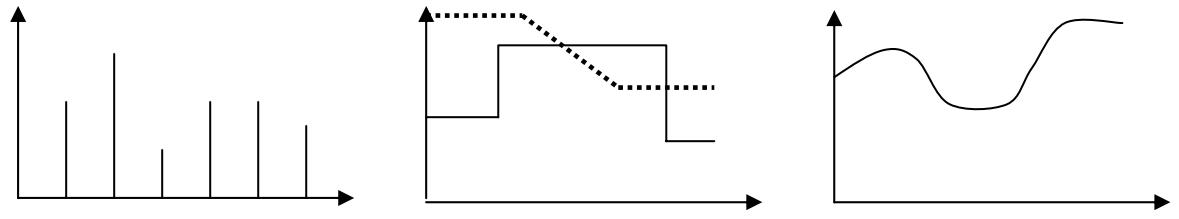
Une brève présentation critique des principales approches modélisatrices nous paraît nécessaire à plusieurs égards. D'abord elle permet de situer notre recherche dans un contexte méthodologique élargi – un devoir pour tout travail scientifique. Ensuite, ce regard sur les concepts fondamentaux dont s'inspirent la grande majorité des projets mis en œuvre, nous aide à cerner les avantages et limites respectifs des modèles et, d'autre part, à pressentir leur applicabilité au domaine de l'information géoréférencée en général et leur couplage aux SIG en particulier.

1.1. Quelques concepts de base et typologies de modèles

En premier lieu, il nous paraît important de revenir sur quelques termes utilisés dans ce contexte afin de les clarifier quant à leur usage ultérieur.

Temps

Il serait vain de vouloir discuter de toutes les facettes que recouvre ce terme, encore plus irréaliste dans ce cadre d'aborder les questions philosophiques sous-jacentes y liées. Pour ne faire appel qu'à une référence étroitement liée au travail de notre unité de recherche et qui aborde le temps dans sa signification géomatique, citons la publication de Mezzadri-Centano (1998) qui donne dans sa thèse intitulée « La modélisation et la projection spatio-temporelle dans les SIG » un résumé des concepts du temps et des approches qui s'y rattachent dans le cadre des SIG. Elle rappelle notamment les recherches sur la notion de temporalité appliquée à l'environnement (Cohen et al., 1997) et les pas de temps ou échelles de temps en fonction du sujet d'études (cf. fig. 55) : l'idée de « granularité » (cf. entre autres Claramunt, 1994, Coquillard et Hill, 1997 ; Paque, 2004 ; Worboys et Duckham, 2004).



a)	b)	c)
Evolution discrète (discontinue)	Evolution par paliers	Evolution continue
L'intervalle temporelle (durée d'observation du phénomène) < résolution temporelle (granularité) de perception de ce phénomène. Exemple : pluviométrie	Changement induit par un stimulus ponctuel ou à durée. Exemple : niveau d'alerte incendies (trait continu) ; débâcle glacière au printemps	L'intervalle temporelle > résolution temporelle. Exemple : variation de la température ou du débit d'une rivière

Fig. 55 : Intervalle temporel et résolution temporelle dans le cadre d'un espace temporel linéaire, continu et bidirectionnel (passé, présent, futur). *Selon : Mezzadri-Centano (1998) et Paque (2004), modifié*

L'auteur mentionne ensuite les recherches sur l'implémentation du facteur temps dans les SIG en insistant sur les travaux importants, entre autres de Langran (1992, 1993), Cheylon et al. (1994), Egenhofer et Golledge (1994) et Lardon et al. (1997).

Modèle, modélisation

Un modèle est une représentation d'un phénomène réel.

En ce sens la donnée, la carte, notre perception sont des modèles de la réalité. Un exemple classique de modèle est la carte, liée à la perception individuelle de la réalité dont elle est « une représentation géométrique plane, simplifiée et conventionnelle, orientée et réduite, de tout ou d'une partie de la surface terrestre et ceci dans un rapport de similitude convenable que l'on appelle échelle » (Paegelow, 2004, in : Paegelow et Vidal, 2004) par un respect des règles sémiologiques.

Une autre signification du terme modèle et de l'action de le concevoir met l'accent sur le comportement d'un phénomène que l'on souhaite simuler :

Un modèle est une représentation fonctionnelle d'un phénomène réel
permettant de simuler son comportement.

En ce sens, le terme modèle tient compte du caractère systémique du phénomène approché.
« La modélisation, ce n'est donc rien d'autre que la pensée organisée en vue d'une finalité pratique. *Modèle* est synonyme de *théorie*, mais avec une connotation pratique : un modèle, c'est une théorie *orientée vers l'action* qu'elle doit servir. Dans la vie courante, nous modélisons tous et tout le temps : à chacun des êtres qui nous entourent, qu'il s'agisse d'objets matériels, de personnes ou d'institutions, nous associons une image mentale qui nous permet d'anticiper son comportement. Nous faisons des simulations pour évaluer les conséquences de nos décisions et choisir parmi les décisions possibles, en tenant compte des incertitudes. Lorsque nos modèles nous semblent faux ou trop grossiers, nous les modifions. » (Volle, 2004).
Coquillard et Hill (1997) insistent sur l'ancienneté et la temporalité des modèles quand ils rappellent que le modèle astronomique héliocentrique de Copernic remplaça la conception géocentrique remontant à Aristote et que le modèle copernicien lui-même fut remplacé par des modèles planétaires plus modernes. Ainsi un modèle représente « à un instant donné, la somme des connaissances accessibles afférentes à un domaine particulier. Que l'expérimentation ou l'observation viennent à prendre en défaut le modèle, et tout est à recommencer…. ». Ainsi la pérennité d'un modèle dépend-elle du paradigme qu'il exprime par abstraction et simplification du système réel étudié. Les deux auteurs citent une définition de Minsky (1965) :

« To an observer B, an object A* is a model of an object A to the extent
that B can use A* to answer questions that interest him about A »

Pour Coquillard et Hill (1997) cette définition, simpliste de prime abord, souligne un aspect essentiel du modèle : il nous est utile pour apprendre quelque chose sur le fonctionnement du système modélisé. Cet aspect est au moins aussi important que la reproduction fidèle de la réalité par le modèle. Les deux auteurs insistent sur le fait que le comportement du modèle, peu importe son imperfection, peut nous apprendre quelque chose sur le comportement du système (cf. système, pages suivantes) réel. Ils citent nombre d'exemples où la théorie précède l'observation : la double hélice de l'ADN de Watson et Crick, les α-hélices des chaînes polypeptidiques de Pauling ou encore certaines trajectoires et le comportement parfois chaotique des régimes cycliques.
Si le modèle ne « colle » pas quantitativement à la réalité, au moins nous sert-il de béquille intellectuelle afin de progresser dans notre connaissance, encore insuffisante, du système à modéliser. Enfin chaque modèle a une finalité déterminant les hypothèses de départ et le degré de simplification.
Appliqué à la géographie de l'environnement, nous pouvons distinguer fondamentalement entre un objectif de :

- Connaissance et de progression dans la compréhension scientifique de phénomènes complexes dont les composants sont multiples et reliés entre eux par des interactions et rétroactions et ceci dans une architecture systémique ouverte – c'est la cas du géosystème le plus simple soit-il.
- Gestion. Même une connaissance imparfaite du comportement du système en question ne dispense pas de l'action gestionnaire et préventive. Qu'il s'agisse de gérer des ressources renouvelables ou de risques naturels, le modèle est un outil de gestion privilégié.

Cependant il existe toute une gamme d'objectifs entre ces deux bouts de la chaîne. « On peut ainsi chercher par la modélisation à simplifier, analyser, synthétiser, expliquer, prévoir, optimiser, simuler, former, décrire, décider, identifier un secteur d'investigation… Ce constat confère un intérêt indéniable à la modélisation. Dans nos domaines, un modèle peut être défini comme une abstraction mathématique dont le but est de représenter au mieux une réalité à travers un système. L'objectif étant de mieux étudier ainsi le système considéré et de mieux prévoir (simuler) son comportement face à différents déterminants.
A propos du développement des démarches modélisatrices et le rôle des modèles pour traiter de l'espace, Le Berre et Brocard (1997) font part d'une position similaire : « La modélisation est d'abord une manière de réfléchir sur les objets scientifiques, une façon de les représenter, qui s'inscrit dans l'ensemble du processus d'élaboration de la connaissance scientifique. Outre qu'elle constitue un moyen approprié pour tester des hypothèses, comprendre des situations présentes ou des évolutions passées, explorer des futurs imaginés, on peut lui attribuer trois grands types de fonctions :

- La production de nouvelles connaissances pour mieux comprendre l'espace : c'est un outil nécessaire à l'étude des localisations et des morphologies spatiales comme à celle des dynamiques et du fonctionnement des unités spatiales dans le temps.
- L'aide à la prise de décision, notamment en aménagement et gestion des territoires.
- La diffusion des savoirs sur l'espace. »

A propos de l'intérêt de la modélisation, jugé de manière assez contrastée par les participants au colloque (3 novembre 1997) de la section 39 du Comité National de la Recherche Scientifique, Le Berre et Brocard (1997) estiment que « la recherche scientifique étant

justement caractérisée par un processus itératif entre faits et théorisation, entre le particulier et le général, à partir d'une problématique. »

Simulation

Certains auteurs font une distinction entre les termes modélisation et simulation. Cette dernière étant liée, soit à la dimension temporelle qu'implique l'idée d'étudier le comportement d'un modèle durant une période de temps donnée, soit à l'idée de prévision de l'état du modèle (extrapolation). Hill (1993, cité dans Coquillard et Hill, 1997) définit la simulation ainsi :

> « La simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions. »

Langlois et Philipps (1997) insistent sur le lien étroit entre innovations technologiques et changements de paradigme à propos des racines des méthodes modernes de simulation. Ainsi décrivent-ils le rôle important vers une « vue multidimensionnelle » de la réalité qu'a joué l'analyse factorielle. Elaborée à partir des travaux de Spearman (1904) la méthode est restée très peu utilisée jusqu'au moment où les ordinateurs suffisamment puissants étaient à la disposition de la communauté de chercheurs (fin des années 1950). Les mêmes auteurs citent d'autres travaux essentiels pour comprendre l'avènement des approches modélisatrices et simulatrices modernes :

- Les travaux de Forrester (1961, 1969 et 1971) intégrant spécifiquement le facteur temps dans les modèles et la simulation de systèmes complexes. Son approche dynamique des systèmes, matérialisée par le langage DYNAMO, facilitait grandement la conception informatique de modèles de simulation.
- On doit également à Forrester (1969) la notion du comportement contre-intuitif des systèmes complexes illustrée à l'exemple du modèle urbain.
- La notion de la limite de croissance d'un système, introduite par Meadows et al (1972) dans leur célèbre ouvrage sur les limites de la croissance du système mondial.

Le Berre et Brocard (1997) rappellent que, en géographie, la grande majorité des modélisations concerne l'étude, statique, des répartitions spatiales et que l'étude des « dynamiques territoriales et leur évolution dans le temps ont été un peu moins modélisées. » Un fait, qu'elles expliquent par l'antériorité des études statiques (modèles de ville, de la centralité, …) sur les approches simulatrices.

Système

Nombre d'auteurs ne font guère de distinction entre les termes modèle et système. Tous les deux sont censés de représenter dans une forme abstraite, simplifiée, parfois idéalisée le comportement plus ou moins complexe d'un phénomène réel.

Cependant une description sommaire des constituants du système et des notions y liées révèlent des nuances d'approche.
La notion de système peut être décrite par quatre descripteurs : un système est un ensemble d'éléments entretenant des relations et séparé de leur environnement avec lequel il peut y avoir des échanges (système ouvert, cf. fig. 56) ou non (système fermé).

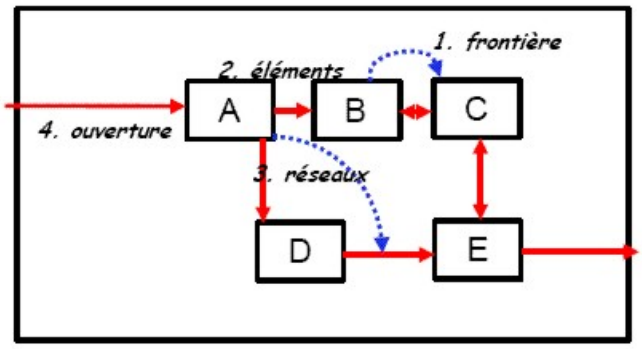


Fig. 56 : Repères d'un système. *Source : Sauvant, 2003*

Sauvant (2003) résume les cinq principaux concepts liés à la notion fonctionnelle du système :

- Les relations entre éléments : elles peuvent de nature matérielle, énergétique ou informelle. Les relations peuvent être directionnelles ou non, linéaires – générant un comportement prévisible – ou non (pouvant générer un comportement imprévisible et inexplicable. Nombre d'auteurs évoquent la rétroaction pour souligner la complexité systémique. En l'occurrence, il s'agit d'une relation en boucle initiée par une information sur l'état du système dont le traitement suppose un centre décisionnel. La rétroaction induit soit un effet régulateur (rétroaction négative, l'exemple type étant la régulation de la température corporelle des mammifères) ou, au contraire, un effet accélérateur (rétroaction positive). Sauvant mentionne également la récursivité permettant « à un système de s'auto-accélérer selon son état et sa finalité ».
- La totalité : il s'agit du principe stipulant qu'un système est plus que la somme de ses éléments ; autrement dit qu'il faut s'intéresser aux relations. Les spécialistes distinguent entre propriétés sommatives (celles des éléments) et constitutives (y ajoutant les propriétés résultant des relations). La différence entre propriétés sommatives et constitutives étant ce que l'on appelle communément l'effet système. Sauvant parle à ce propos du concept d'émergence.
- L'organisation hiérarchique (niveau d'abstraction pour Coquillard et Hill, 1997): la conception systémique permet de distinguer entre niveaux ou échelles d'organisation aussi bien sur le plan spatial (un exemple bien connu est celui des échelles spatiales en astronomie allant de l'atome, voire de ses constituants, via le système solaire à celle de l'univers) que temporel (temps de la transmission d'une information par les synapses, vie d'un individu, d'une espèce, …). Selon le niveau retenu, les niveaux inférieurs sont souvent considérés comme des boîtes noires dans une approche analytique tandis que l'intérêt porté à des niveaux d'organisation plus élevés, appelés aussi englobants, est nommée une attitude synthétique ou encore intégrée.
- La complexité : un système est appelé complexe si, à un instant donné, nous n'en avons pas une connaissance et une compréhension exhaustive. Sauvant mesure la complexité notamment en fonction du nombre et de la nature des relations entre éléments et niveaux d'organisation ainsi que du nombre d'éléments.

- Les régulations : l'auteur distingue entre un sous-système opérant et un sous-système régulateur qui pilote ce premier – une structuration s'appliquant à tout système contrôlé ou régulé tel que l'organisme vivant (fig. 57).

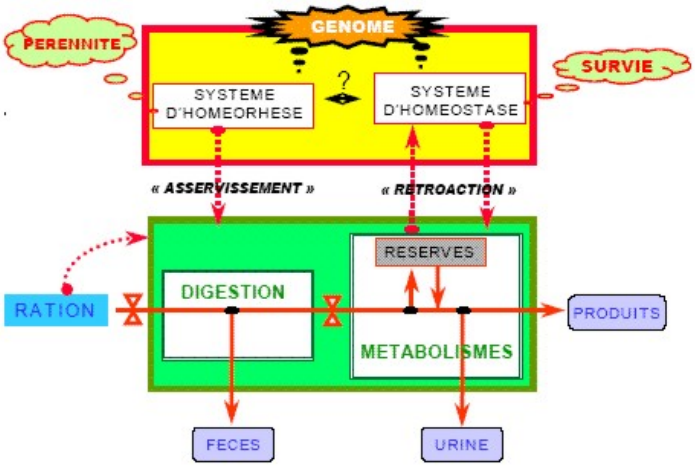


Fig. 57 : Compartimentation en sous-systèmes d'un système complexe et contrôlé opérant et régulateur : l'organisme vivant. *Source : Sauvant, 2003*

Ainsi peut-on différencier des approches modélisatrices faisant ressortir une spécificité systémique. Sauvant résume ce débat en qualifiant la démarche classique cartésienne – qu'il oppose à l'approche systémique – dans un premier temps de descendante, c'est-à-dire visant à expliquer une question par un parcours des niveaux d'organisation du système jusqu'à un niveau inférieur auquel on peut obtenir une connaissance exhaustive des propriétés des éléments. La démarche de Descartes adopte ensuite une démarche ascendante « élaborant la connaissance du système par additivité des propriétés mesurées au niveau des éléments et des niveaux d'organisation sous-jacents ». Se concentrant sur la connaissance des éléments, elle est qualifiée de sommative tandis que l'approche systémique met l'accent sur la connaissance des relations et leur signification pour le comportement du système : attitude constitutive privilégiant les facteurs émergents.
Si la démarche cartésienne peut est qualifiée de prévisionnelle dans le sens où elle tend à prolonger quantitativement le comportement du passé de manière assez mécanique, l'approche systémique est prospective.
Une autre différence d'approche entre démarche cartésienne et systémique se situe sur le plan de la démonstration et de la validation du modèle. Ainsi l'approche systémique ajoute au principe d'évidence, ne tenant compte uniquement des preuves irréfutables, celui de pertinence considérant également un recoupement d'indices et l'intime conviction du chercheur confronté à des systèmes complexes – tel est le cas de la géographie de l'environnement. Le débat sociétal est vif à ce sujet et se cristallise, au niveau de l'action, sur le principe de précaution.

Sur la base de ces rappels il est légitime de considérer le concept de modèle comme étant plus large et plus général que celui du système (Sanders, 2001), qui a une connotation comportementale et qui relève d'une approche dite systémique particulière. En termes géomatiques, le concept de système apparaît comme un sous-ensemble de celui du modèle.

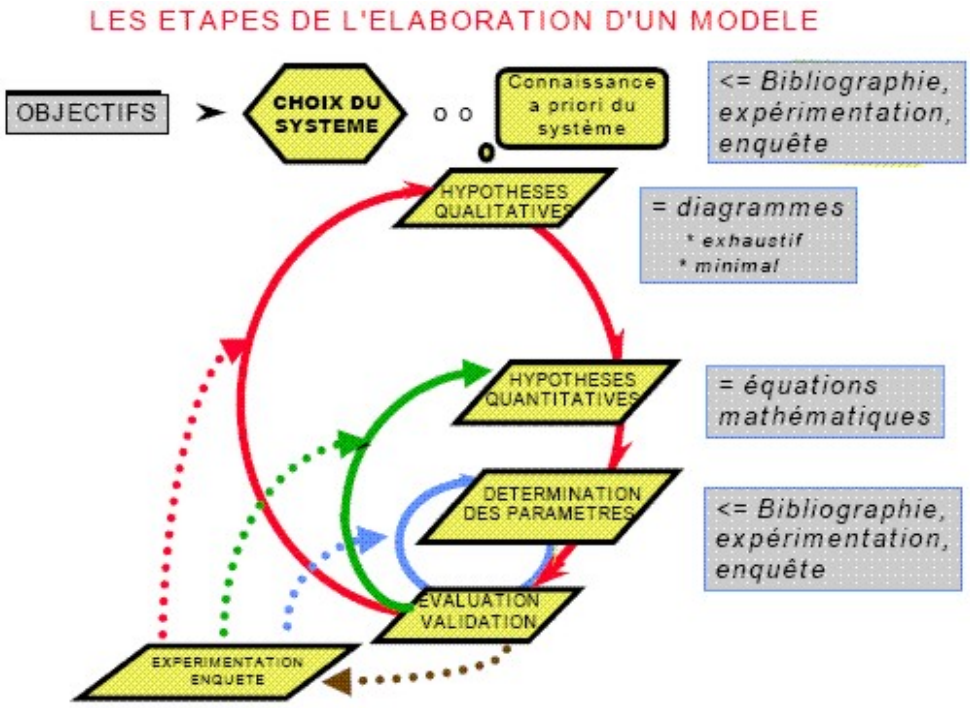


Fig. 58 : Les étapes de l'élaboration d'un modèle. *Source : Sauvant, 2003*

Quel que soit le type de modèle choisi, la démarche générale de la modélisation (fig. 58) est la même. Le processus de modélisation commence avec la définition des objectifs et des hypothèses de départ. Cette phase est suivie de la description des données et de leur définition (métadonnées), des connaissances sur le comportement (relations) et de la définition des restrictions simplificatrices du modèle. La représentation graphique du modèle (cf. fig. 66) est un instrument fondamental assurant une vue synoptique de ce processus conceptuel qui s'accompagne d'une formalisation plus ou moins poussée. Suit la mise en œuvre du modèle, la validation des résultats et ses conséquences sur la modélisation. Essentielle pour la crédibilité d'un modèle, la validation revêt plusieurs significations et peut être scindée en au moins trois domaines. Il s'agit, d'abord, de s'assurer du fonctionnement correct du programme tout au long de l'implémentation du code que se soit au niveau des routines élémentaires, de leur assemblage ou encore de leur insertion dans l'environnement informatique. Cette étape, qualifiée aussi de validation interne, est appelée *vérification* du modèle. Suit la phase de *calibration* du modèle ayant pour objectif de tester la conformité du comportement global du modèle par rapport aux objectifs. Pour les modèles basés sur l'intelligence artificielle, il s'agit de la phase d'*apprentissage*. L'ensemble s'inscrit dans un cadre plus large, celui de la *validation* du modèle qui s'opère tout au long du processus de modélisation, de l'adéquation du modèle avec les objectifs à l'évaluation de la significativité des résultats. Coquillard et Hill (1997) utilisent cette terminologie en se référent aux définitions de la Society for Computer Simulation (SCS, 1979) et listent nombre de références bibliographiques relatives à ce sujet. Ils distinguent plusieurs types de validation :

- Validation par confrontation (à l'avis d'un expert)
- Validation par répétitivité (conformation avec la réalité ou les résultats d'autres modèles) et validation prédictive pour les simulations par confrontation des résultats aux observations
- Validation statistique

Cet enchaînement est très formalisé en informatique (à titre d'exemple : Crochepeyre, 1996 ; Connuau, 2000 pour ne citer que deux références disponibles sur Internet) où on retrouve les étapes conceptuelle (modèle conceptuel de données, MCD), organisationnelle (modèle logique des données, MLD) et physique (organisation, enchaînements des tâches, cf. fig. 59).

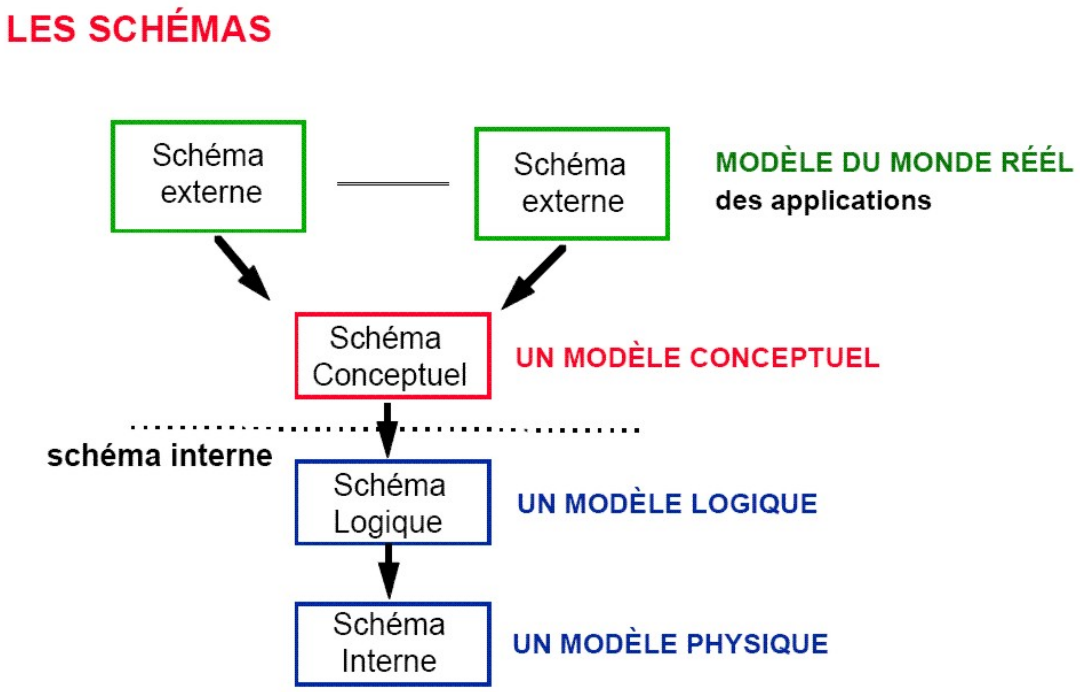


Fig. 59 : Les étapes de modélisation dans le cadre des bases de données relationnelles.
Source : Crochepeyre, 2002

La croissante complexité en matière de modélisation constitue, enfin, un autre aspect à rappeler – celui de son efficacité. Coquillard et Hill (1997) l'expriment ainsi : « Il n'est donc pas exact que l'accroissement systématique de la complexité du modèle par ajout de variables d'état et de forçage donnera de substantiels gains en termes de validation du modèle et de connaissances. Au-delà d'un certain point, l'ajout de variables supplémentaires ne fait qu'augmenter la complexité du modèle et accumuler les incertitudes. Il se peut même que ces accroissements d'incertitude fassent alors radicalement diverger le modèle par rapport au système réel en fonctionnement. Il convient souvent de préférer des variables holistiques à plusieurs variables élémentaires dont les incertitudes ne peuvent qu'oblitérer la qualité du modèle ; on parle aussi dans ce cas d'agrégation. Il va de soi, par ailleurs, qu'accroître la complexité du modèle ne peut qu'ajouter des difficultés de mise en œuvre informatique : très rapidement des problèmes de capacité de mémoire, de facilité de vérification de la cohérence interne du logiciel, de vitesse de calcul peuvent apparaître. La simplification – dans certaines limites – est une vertu en modélisation. » Les auteurs illustrent leur propos par deux graphiques (fig. 60).

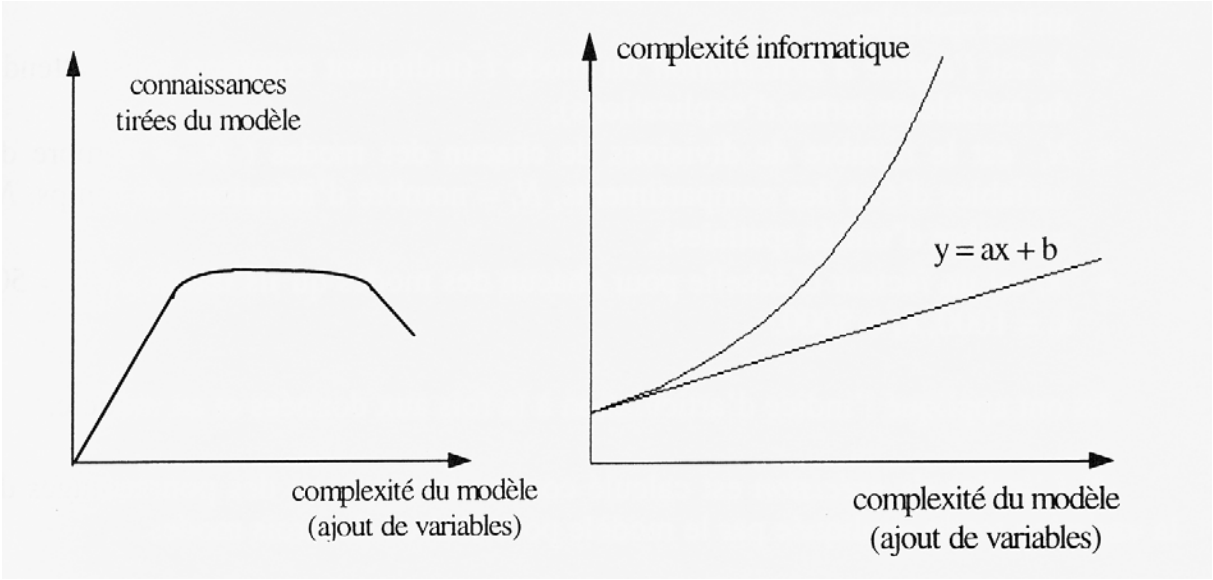


Fig. 60 : Relations entre complexité du modèle et connaissances tirées du modèle (à gauche) et entre complexité du modèle et complexité de mise en oeuvre informatique (à droite).
Source : Coquillard et Hill, 1997

Ainsi, les connaissances tirées du modèle, le gain engrangé, augmentent lors de la complexification d'un modèle simple, mais plafonnent à partir d'un certain seuil de complexité du modèle. D'autre part, les auteurs estiment que la complexité informatique augmente, dans le meilleur des cas, de manière linéaire par rapport à celle du modèle ; mais cet accroissement de la mise en œuvre informatique peut aussi devenir exponentiel…

Typologies

Sauvant (2003) propose de classer les modèles selon trois critères :

- Modèles empiriques versus modèles mécanistes : un modèle empirique décrit le système de l'objet de recherche comme une boîte noire et ne considère que les flux d'entrée et de sortie (telle fut notre approche pour le système culture-sol en recherches doctorales par rapport à la dynamique de l'azote). Un modèle mécaniste tend à expliquer le comportement du système par une connaissance de ses éléments et relations. La mise en œuvre des modèles mécanistes est très fréquente et s'appuie souvent sur une formalisation par équation différentielle dynamique déterministe agissant sur les sous-ensembles du système (fig. 61). Leur limite réside notamment dans le nécessaire caractère linéaire des relations.
- Modèles déterministes versus modèles aléatoires : tandis qu'un modèle déterministe se base sur des paramètres à valeurs fixes, un modèle aléatoire intègre également la variation de ces paramètres.
- Modèles statiques versus modèles dynamiques : un modèle dynamique intègre, contrairement au modèle statique, le facteur temps.

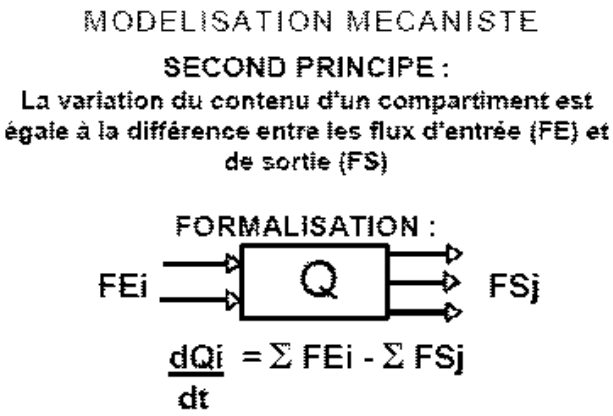


Fig. 61 : Exemple d'un modèle mécaniste. *Source : Sauvant, 2003*

Coquillard et Hill (1997) présentent une typologie de modèles plus nuancée (cf. fig. 62) :

- Modèles analytiques : Ils sont déterministes (non probabilistes) et continus dans l'espace et le temps reposant sur des équations différentielles. Considérés par les auteurs comme le type de modèle le plus simple, leur formalisme mathématique rend la mise en œuvre facile, mais leur champ d'application (non prise en compte d'effets spatiaux (répartition, interactions à distance, …) est très limité.
- Modèles stochastiques : Les modèles probabilistes – comme l'analyse de Markov - offrent également une implémentation informatique facile ; leur usage est cependant limité par l'indépendance du modèle par rapport au temps et à l'espace.
- Modélisation par simulation : Les auteurs distinguent entre deux ensembles :
  a) Simulations à composantes analytiques (à temps discrétisé ou non) : modèles théoriques assemblant plusieurs modèles analytiques, modèles à compartiments avec description du système à l'état d'équilibre par équations différentielles et systèmes à autorégulation (rétroaction négative), appelés aussi *system dynamics*.
  b) Simulations purement discrètes : Le temps y « est divisé en intervalles au cours desquels il ne se passe rien. Les événements ne se déroulent donc qu'à certaines dates séparées par ces intervalles de temps (fixes ou variables) » contrairement à la simulation continue, où « le modèle est à temps continu et c'est la technique de résolution qui discrétise le temps ». Les auteurs signalent que ce type de modèle, le plus complexe et puissant, connaît de nombreuses variantes pouvant être combinées. La simulation peut être déterministe (calcul quantitatif sur la base d'équations) ou stochastique (calcul quantitatif s'appuyant sur une variable aléatoire obéissant à une loi mathématique (distribution spatiale par exemple). Au sein de cet ensemble, Coquillard et Hill (1997) distinguent entre : simulation aléatoire (Monte-Carlo), simulations à événements discrets et « méthodes dites de vie artificielle ».

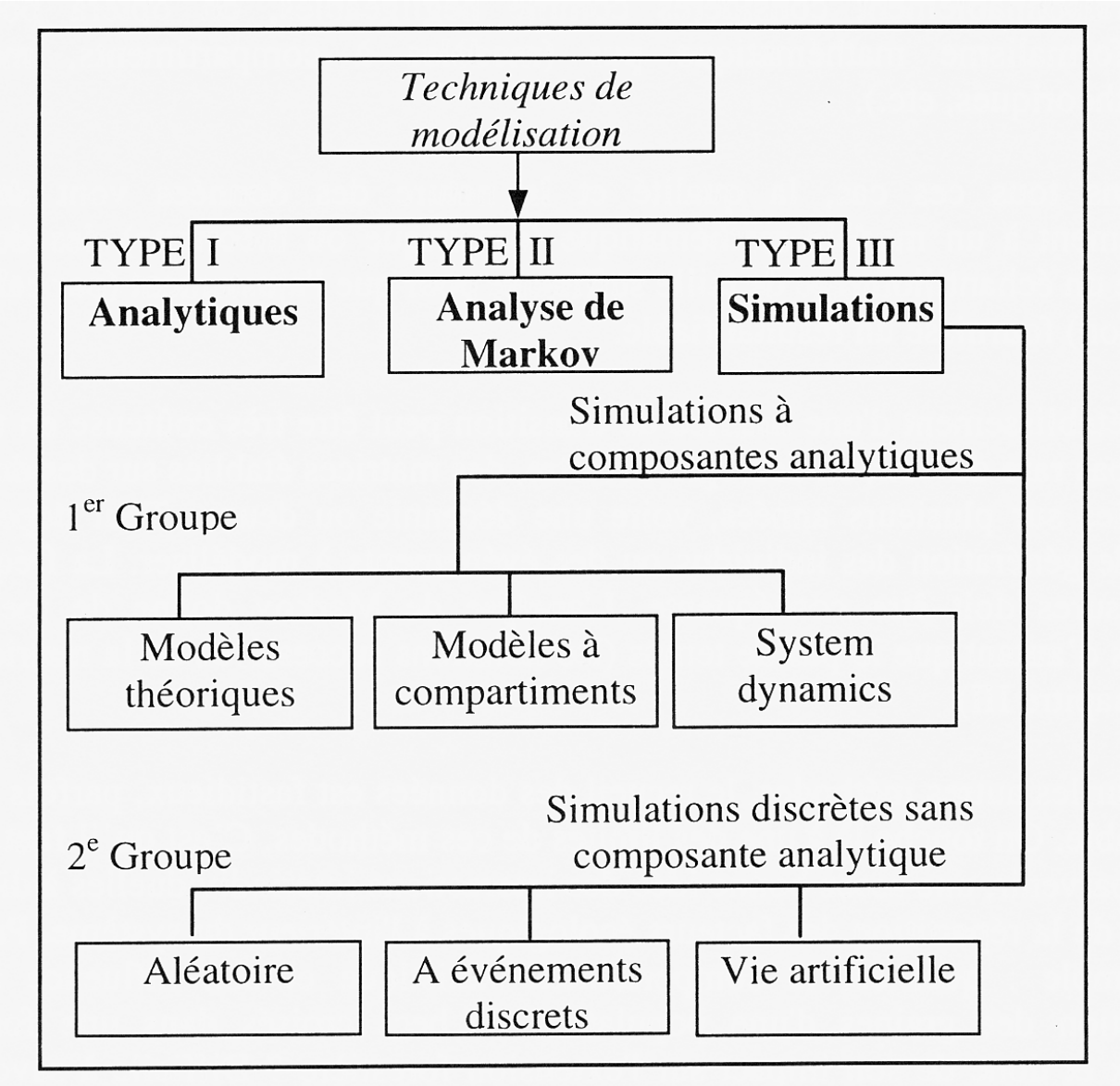


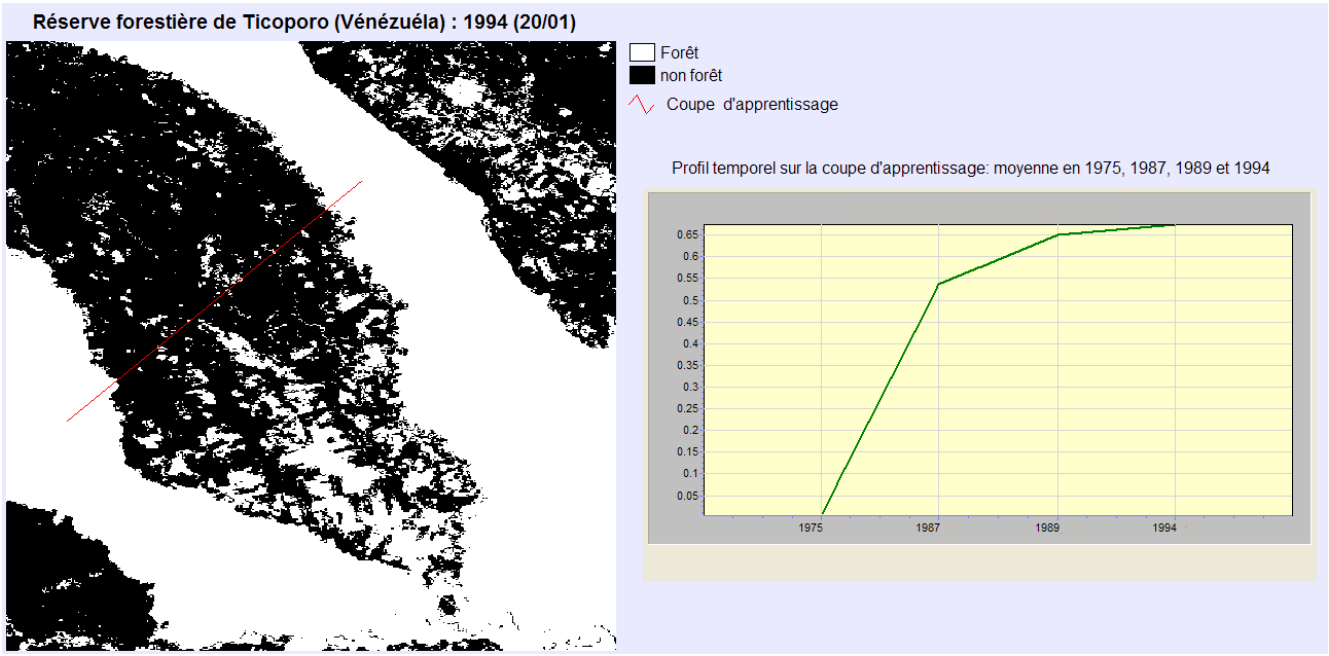
Fig. 62 : Typologie de modèles. *Source : Coquillard et Hill, 1997*

Nous prendrons appui sur la typologie des modèles proposée par Coquillard et Hill (1997) sachant que les recherches récentes la ramifient davantage.
Dans un premier temps nous rappellerons brièvement les techniques classiques de gestion du facteur temps dans les SIG avant de caractériser les principales approches modélisatrices listées.

1.2. Gestion du temps dans les SIG

Dans leur phase émergente, les logiciels SIG géraient le temps comme un attribut parmi d'autres. Ainsi, l'analyse verticale – la mise en relation de plusieurs plans d'information par

des opérateurs booléens, d'évaluation ou arithmétiques – permet de calculer indifféremment un indice de végétation et l'évolution des comptes numériques entre deux dates.
La gestion du multitemporel a été intégrée rapidement dans les SIG raster et les logiciels de gestion d'image pour tenir compte de séries chronologiques longues (cf. fig. 63).



Ticoporo janvier 1994 Profil des moyennes de la coupe d'apprentissage sur 4 dates

Fig. 63 : Profil temporel : moyenne de la coupe d'apprentissage en 1975, 1987, 1989 et 1994 – réserve forestière de Ticoporo (Andes vénézuéliennes). *Source : Selleron et Mezzadri-Centano, 2002*

La simple restitution cartographique d'un phénomène multitemporel pose déjà des problèmes. Prenons l'exemple d'une cartographie élémentaire de l'occupation du sol avec cinq catégories correspondant à trois dates différentes. Les possibilités de restitution sont les suivantes :

- Une cartographie des évolutions par période (potentiellement 25 modalités).
- Une cartographie des évolutions entre la première et la dernière date (faisant l'impasse sur la date intermédiaire).
- Une cartographie de toutes les évolutions (potentiellement 125 modalités).
- Des cartographies sommaires : zones stables, nombre de changements, …
- Une cartographie synthétique focalisant sur les principales évolutions (réduction de l'information).

Cet exemple banal montre l'impossibilité d'une restitution exhaustive. Le lecteur serait noyé sous une avalanche de données cachant l'information. Le fait de devoir tenir compte du produit cartésien des catégories de la carte limite l'expression exhaustive à des phénomènes

sommaires comme, par exemple, le sens d'évolution (hausse, stagnation, baisse) et ceci à trois dates au maximum (neuf modalités).
Sur la base d'une analyse exhaustive, la solution la plus couramment pratiquée consiste à sélectionner les dynamiques majeures (cf. fig. 64).

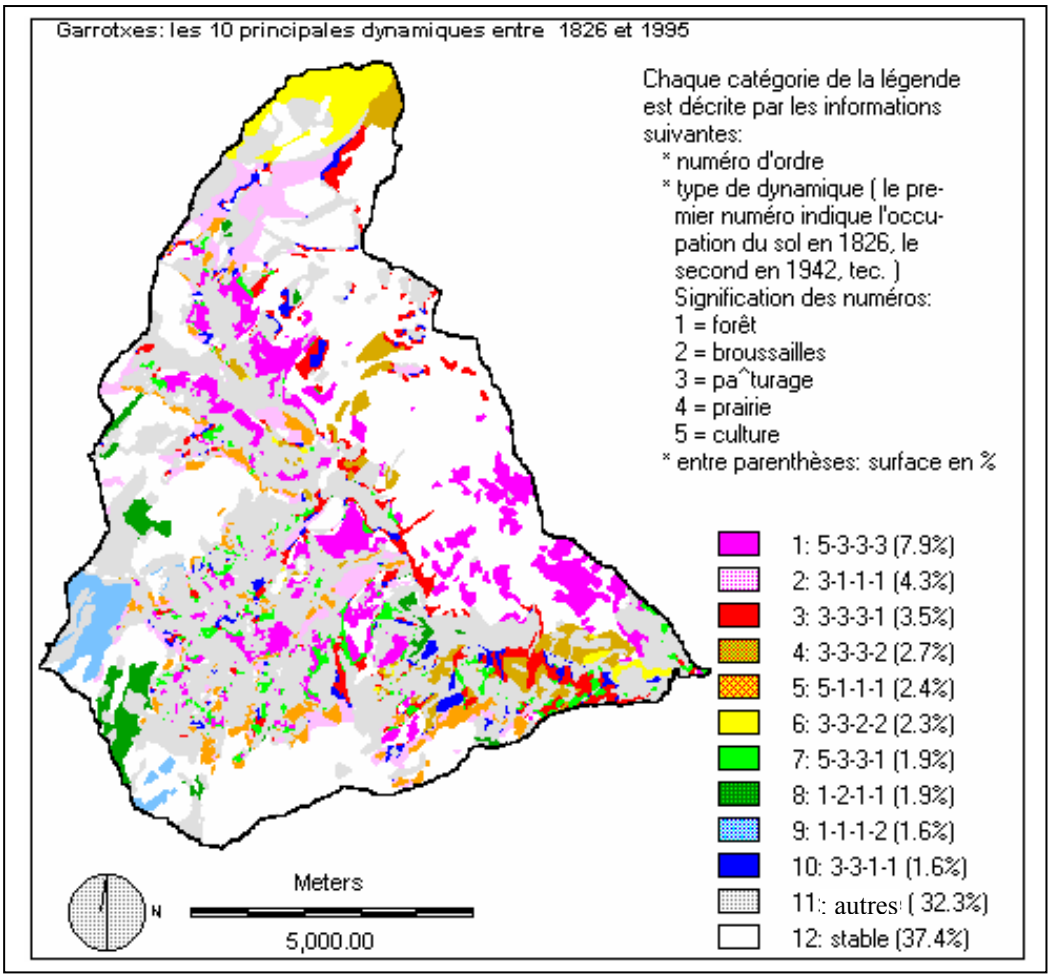


Fig. 64 : Les dix principales dynamiques observées parmi potentiellement 625 (cinq modalités d'occupation du sol à cinq dates), Garrotxes (66). *Source : Paegelow et Camacho Olmedo, 1997*

Si l'attribut étudié au cours du temps est de nature quantitative, il se prête à l'emploi de mesures statistiques comme la régression ou la corrélation ou encore l'analyse en composantes principales (ACP).

Une autre technique comparant une information multicomposite quantitative à deux dates différentes consiste à mesurer la distance attributaire dans le temps et dans un espace dans le nombre de dimensions correspondent au nombre de composantes de l'information. Le principe est décrit dans la figure 65 et illustré par un exemple dans la figure 66.

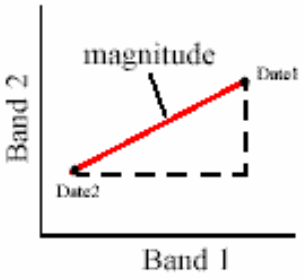


Figure 8-1

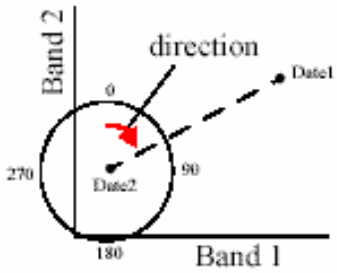
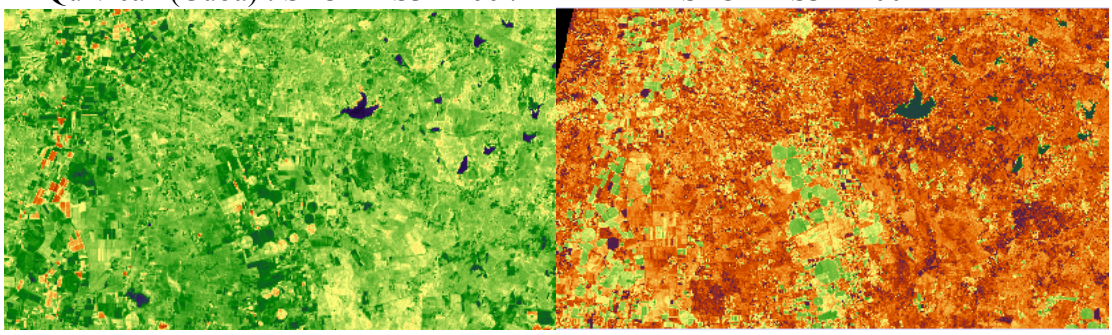


Image de magnitude
La magnitude vectorielle est la racine carrée des différences (pour chaque composante) portées au carré et additionnées

Image de direction
Elle présente l'angle mesuré dans le sens des aiguilles à partir de la date 2 et d'une verticale

Fig. 65 : Principe de la « vector change analysis ». *Source : Eastman, 2003*

Quivican (Cuba) : SPOT XS3 – 1997 SPOT XS3 – 2002



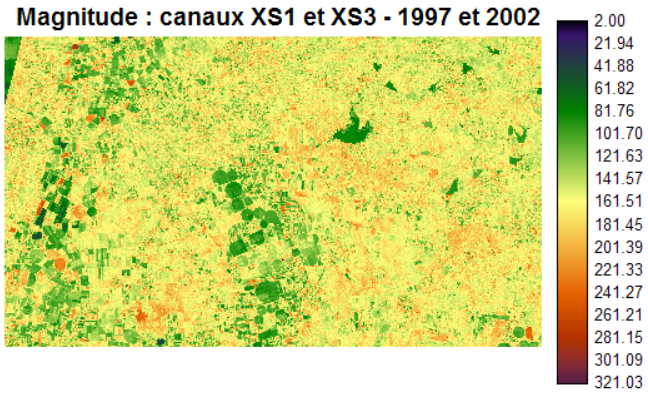


Fig. 66 : Exemple de calcul de la magnitude vectorielle entre deux dates et pour une information spatiale à deux composantes. Images SPOT 1997 et 2002 (canaux XS1 et XS3), Quivican, sud de La Havane, Cuba

Le logiciel SIG Idrisi offre, depuis quelques années, une sorte de boîte à outils à interface graphique permettant de créer des modèles (au sens large du terme). Modèles de chaînes de traitements paramétrables, encapsulation sous forme de sous-modèles et boucles de rétroaction à simuler le facteur temps à pas discrets. Il s'agit, en fait, d'un simple transfert de concepts de langage de programmation élémentaires pour une mise à disposition de non spécialistes en informatique. La figure 67 montre un tel modèle SIG censé simuler, de manière très élémentaire, la croissance urbaine. Le modèle repose sur un certain nombre de contraintes et de facteurs d'aptitude pondérés. Ces deux types de critères ont été élaborés dans

une phase préliminaire par évaluation multicritère. La proximité est introduite par un filtrage et un générateur de nombres aléatoires intervient dans la partie amont du modèle pour tenir compte d'une certaine incertitude quant aux critères explicatifs. Dans la carte d'aptitude finale, on choisit les X ha de terrains ayant les scores les plus élevés pour les ajouter aux zones déjà urbanisées. La flèche rouge est une boucle permettant un processus itératif, la simulation sur plusieurs pas de temps.

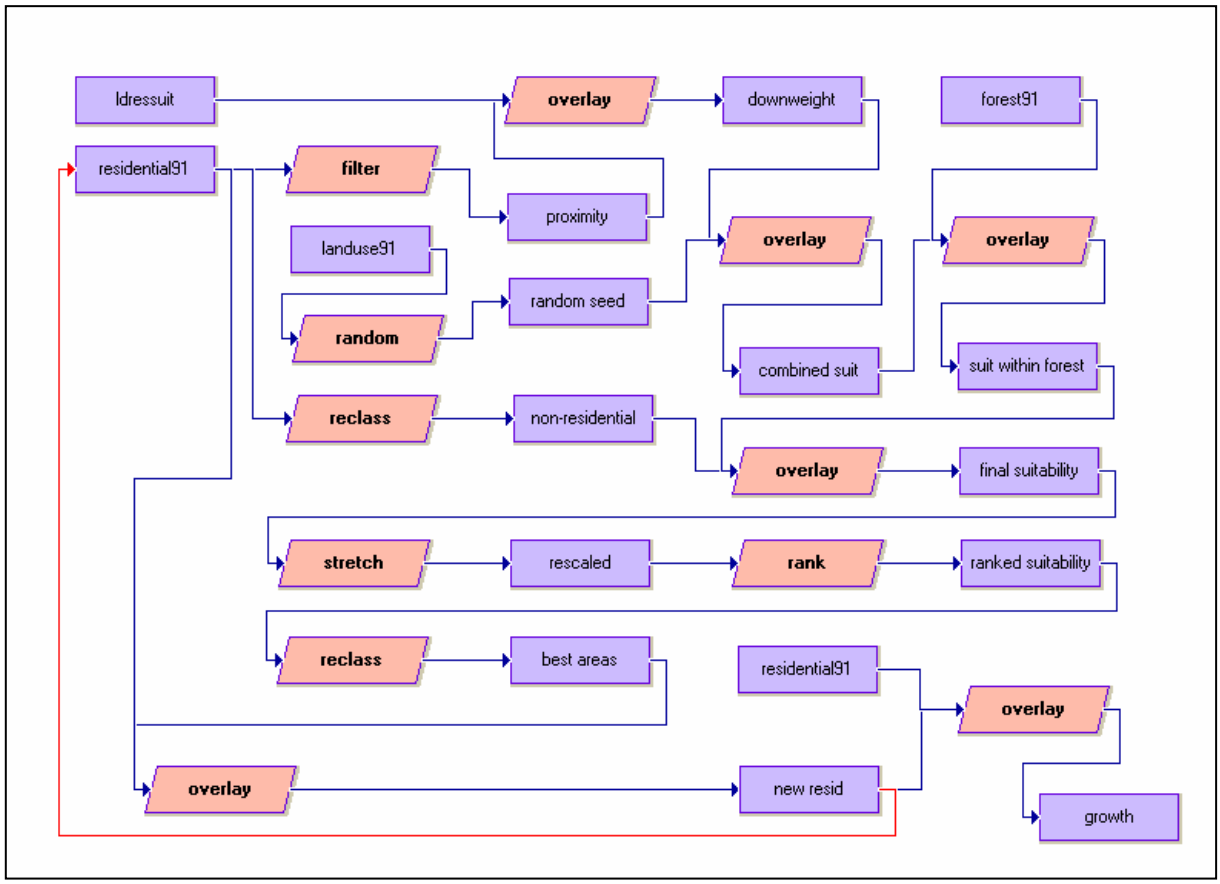


Fig. 67 : Modèle SIG de simulation de croissance urbaine sous Idrisi Kilimanjaro

1.3. Modèles déterministes

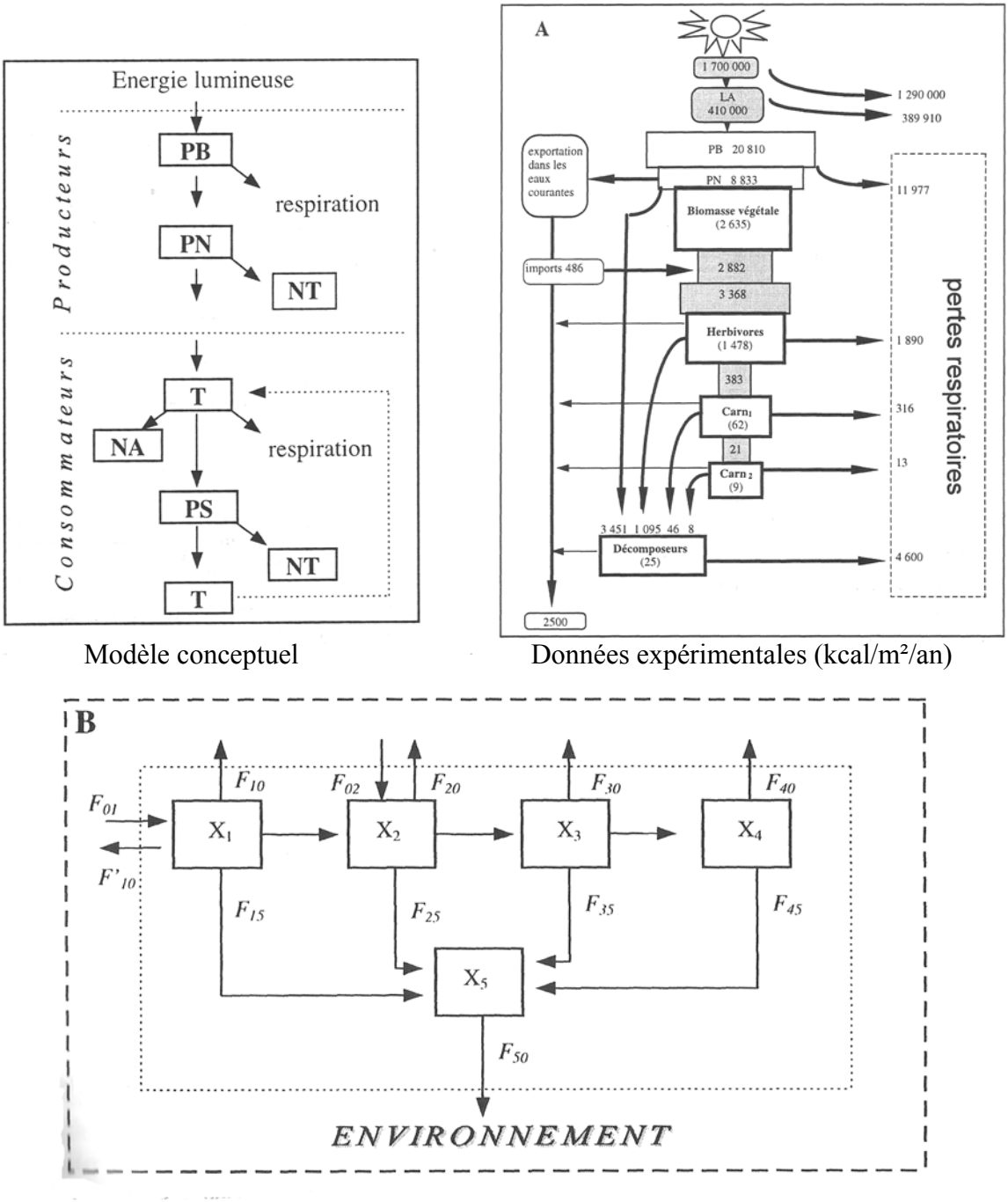
Il s'agit d'une famille de modèles caractérisés par un formalisme mathématique. L'objet d'étude est entièrement décrit par des équations ne laissant aucune place à l'aléa, même si le comportement du système peut se révéler chaotique en cas d'équations non linéaires (Coquillard et Hill, 1997).
Une branche des modèles déterministes sont les modèles analytiques qui, selon les auteurs « sont des modèles purement continus et déterministes, reposant sur des équations

différentielles résolues » comme le modèle logistique. Il s'agit, pour utiliser la terminologie de Sauvant (2003) de modèles mécanistes.
Le terme « continu » signifie que ces modèles se comportent de manière continue dans le temps mais aussi les états du système (appelé « espace de phase » par Coquillard et Hill). Il en résulte que ce type de modèle se situe à un degré d'abstraction élevé permettant de modéliser plus aisément des flux (énergétique, matériel, informel) des écosystèmes que la croissance d'une population (dont le nombre varie continuellement dans le temps mais uniquement par des valeurs entières – état du système). Etant donné que nombre de problèmes géosystémiques et environnementaux peuvent se concevoir continus dans le temps mais discrets dans les états du système, il convient de choisir un pas de temps de calcul adapté à l'échelle de temps de l'objet d'étude.
L'approche déterministe est également utilisée dans le cadre de la modélisation du comportement d'un système au cours du temps – la simulation. On se situe alors, dans la typologie des modèles proposée par Coquillard et Hill (fig. 62) dans le premier groupe : les simulations à composantes analytiques. Dans ce domaine les applications des modèles déterministes sont très nombreuses et s'étendent des modèles de croissance de populations classiques en passant par les modèles hydrologiques à l'échelle du bassin versant (INRS, 2000) à des modèles écosystémiques intégrant, partiellement, l'effet spatial. Coquillard et Hill insistent sur l'ancienneté des modèles logistiques en rappelant les travaux de Verhulst (1838) qui modélisa la croissance d'une population (*system dynamics*).
Goreaud (2004) rappelle que les modèles déterministes ont été d'abord élaborés pour modéliser la croissance des populations :

- Loi de Malthus (1798) – un modèle déterministe avec des pas de calcul discrets
- Les matrices de Leslie[11] (1945) pour tenir compte de l'age des populations – un modèle déterministe avec pas de temps de calcul discrets et adapté aux cycles de reproduction
- Le modèle Lotka (1924) Voltera (1928) modélisant les interactions entre espèces (relation de prédation et de coexistence et leur influence sur l'évolution des populations), un exemple de comportement plus complexe
- Des modèles de compétition introduisant un effet spatial : modèle de Tilman (1977) et de Huston et De Angelis (1994)

Un des pionniers de la modélisation déterministe en écologie est sans doute Odum (1957). Son modèle de Silver Springs est un des premiers modèles, dits à compartiments, simulant le fonctionnement énergétique d'un écosystème (cf. fig. 68).

[11] Coquillard et Hill (1997) abordent les matrices de Leslie comme une analyse dérivée de l'approche markovienne, modèle probabiliste par excellence, même si les deux auteurs restreignent la portée de cette attribution en écrivant « par ailleurs, la matrice de Leslie ne peut être qualifiée de purement stochastique puisqu'elle ne contient pas uniquement des probabilités … ».



Modèle conceptuel — Données expérimentales (kcal/m²/an)

Modèle mathématique déterministe

Fig. 68 : Modèle du flux énergétique de Silver Springs, Floride : modèle conceptuel, données expérimentales et modèle mathématique déterministe. *Source : Odum (1957) et Patten (1971), Keen et Spain (1992) ; in : Coquillard et Hill, 1997*

Eugène Odum (1971) consacre un chapitre entier de son célèbre ouvrage *Fundamentals of Ecology* à l'écologie systémique dont l'approche est déterministe.

La modélisation déterministe est toujours considérée comme une approche performante pour la simulation globalisante des écosystèmes (Goreaud, 2000) et ceci notamment à cause de la simplicité de mise en œuvre et du fait qu'elle fournit des résultats exacts et pas seulement statistiques (Coquillard et Hill, 1997). Ces limites sont le faible degré de spatialisation –

l'espace étant considéré homogène et isotrope – et une limitation évidente du degré de complexité du système à modéliser. Enfin, l'approche déterministe considère que tout peut chiffré et traduit en équations alors que l'on se rend compte, de plus en plus, de l'incertitude affectant certaines données et de notre connaissance souvent lacunaire.

1.4. Modèles et simulations stochastiques

On qualifie également ces modèles d'aléatoires ou encore de probabilistes. Si le modèle évolue dans le temps, considéré discret, on parle de simulation stochastique ou de simulation Monte Carlo.

On part de l'idée que l'observation décrit la réalisation d'un état du système parmi n états possibles. La liste des états est donc fini et connu. Un exemple souvent cité est le lancement d'un dé. Chaque lancement réalise un des six états possibles qui, à l'instant t, sont exclusifs. Il s'agit d'une variable aléatoire dans le sens de Legendre et Legendre (1984). Les réalisations successives de la variable (dé lancé à plusieurs reprises) forment un processus discret. Un processus discret « est un phénomène qui n'évolue pas de façon continue au cours du temps mais selon une suite croissante de nombres réels positifs … nommés instants » (Coquillard et Hill, 1997). L'état du système n'évolue que d'un instant à l'autre. Ajoutons que dans l'exemple choisi, la réalisation des états est indépendant du temps. Ainsi la probabilité de l'état réalisé au prochain lancement ne dépend pas de l'état actuel de la variable. Nous pouvons qualifier cette configuration aussi de chaîne de Markov homogène.

« Un modèle stochastique est un modèle où les éléments *Xt* de la série sont considérés comme des *variables aléatoires*. Lorsqu'on considère une série ($Xt \quad t \cap T$) de variables aléatoires, on parle de *processus stochastique* (ou *fonction aléatoire*). La théorie des processus stochastiques est la base théorique de l'étude des modèles stochastiques. » (Dufour, 1998). L'auteur distingue notamment deux catégories de modèles stochastiques :

- Modèles à tendance ou modèles d'ajustement : l'évolution du comportement du système est assimilé à une tendance (linéaire, polynôminale, exponentielle, logistique, …). Ces ajustements peuvent être déterministes ou probabilistes. L'ajustement peut porter sur l'ensemble de la série d'observations ou un sous-ensemble. Dans ce dernier cas on parle d'ajustement local (moyenne mobile, lissage exponentiel).
- Modèles explicatifs : on dispose, outre la série d'observations, de variables explicatives exogènes.

Les applications de modèles stochastiques sont très nombreuses. Une abondante littérature est notamment consacrée aux problèmes écologiques (entre autres : Clément et Prouzt, 1996 ; Fournier, 2004 ; Lara De et al., 2004) et hydrologiques (entre autres : Arnaud, 1997, Chaouche, 2001 ; Lebel et al., 2001).

Simulation Monte Carlo

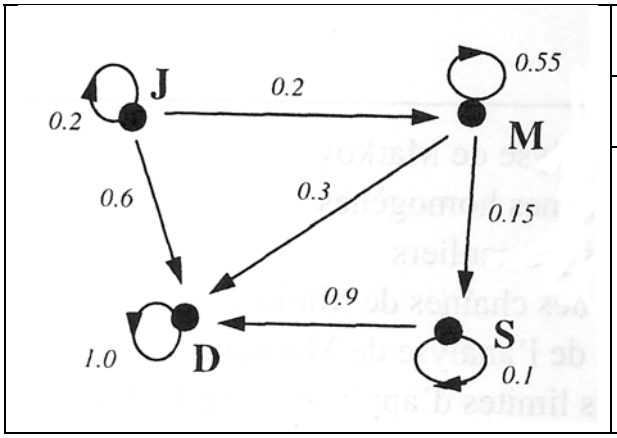
La méthode doit son appellation au nom du casino et a été introduite par Ulam et Metropolis (Metropolis et Ulam, 1949). Metropolis (1957) décrit notamment les débuts de cette approche. Coddington (1996) en donne un aperçu complet des principes et applications qui est

complété par la WWW Virtual Library (2004), proposant notamment un nombre conséquent de programmes au téléchargement.
La méthode repose sur un générateur de nombres aléatoires (exemple de lancement du dé) et trouve de nombreuses applications dans le calcul d'intégrales en mathématique et en physique et, de manière plus générale, pour simuler le comportement de systèmes dont les éléments sont mal connus et, par conséquent, susceptibles d'être approchés par des probabilités.

Analyse de Markov

Nous détaillerons la description de l'analyse de Markov pour deux raisons. Il s'agit d'une approche probabiliste exemplaire et elle est très utilisée pour la simulation de systèmes écologiques et environnementaux. Elle constitue une brique-clé dans le modèle de simulation prospective que nous avons établi et qui sera présenté dans le chapitre 2.

Le mécanisme de l'analyse de Markov est illustré par Coquillard et Hill (1997) par un exemple simple, celui de l'observation du développement d'une population d'individus au cours du temps avec les états suivants : juvénile (J), maturité sexuelle (M), sénescence (S) et décès (D). La figure 69 présente ces quatre états possibles et les probabilités de transition.



		Etats finaux			
		J	**M**	**S**	**D**
Etats initiaux	**J**	0.2	0.2	0	0.6
	M	0	0.55	0.15	0.3
	S	0	0	0.1	0.9
	D	0	0	0	1.0

Fig. 69 : Développement d'individus d'une population avec quatre états possibles (sommets) et probabilités de transition entre états (arcs) représentées sous forme de matrice de transition (à droite). *Source : Coquillard et Hill, 1997 ; modifié*

Cette chaîne de Markov est qualifiée d'ordre 1 dans la mesure où il s'agit d'un processus aléatoire discret à états finis et que la probabilité pour que le système soit à un état donné à l'instant t+1 ne dépend que de l'état du système à l'instant t. Cette restriction signifie qu'il est possible de prédire l'état du système futur (à l'instant t+1 précisément) uniquement sur la base de son état actuel. Pour cette raison le processus markovien d'ordre 1 est qualifié de *sans mémoire* par nombre d'auteurs. Hêche (2001) propose un simulateur des chaînes de Markov en ligne sous forme d'appliquette Java illustrant les principes fondamentaux du modèle markovien (cf. fig. 70).

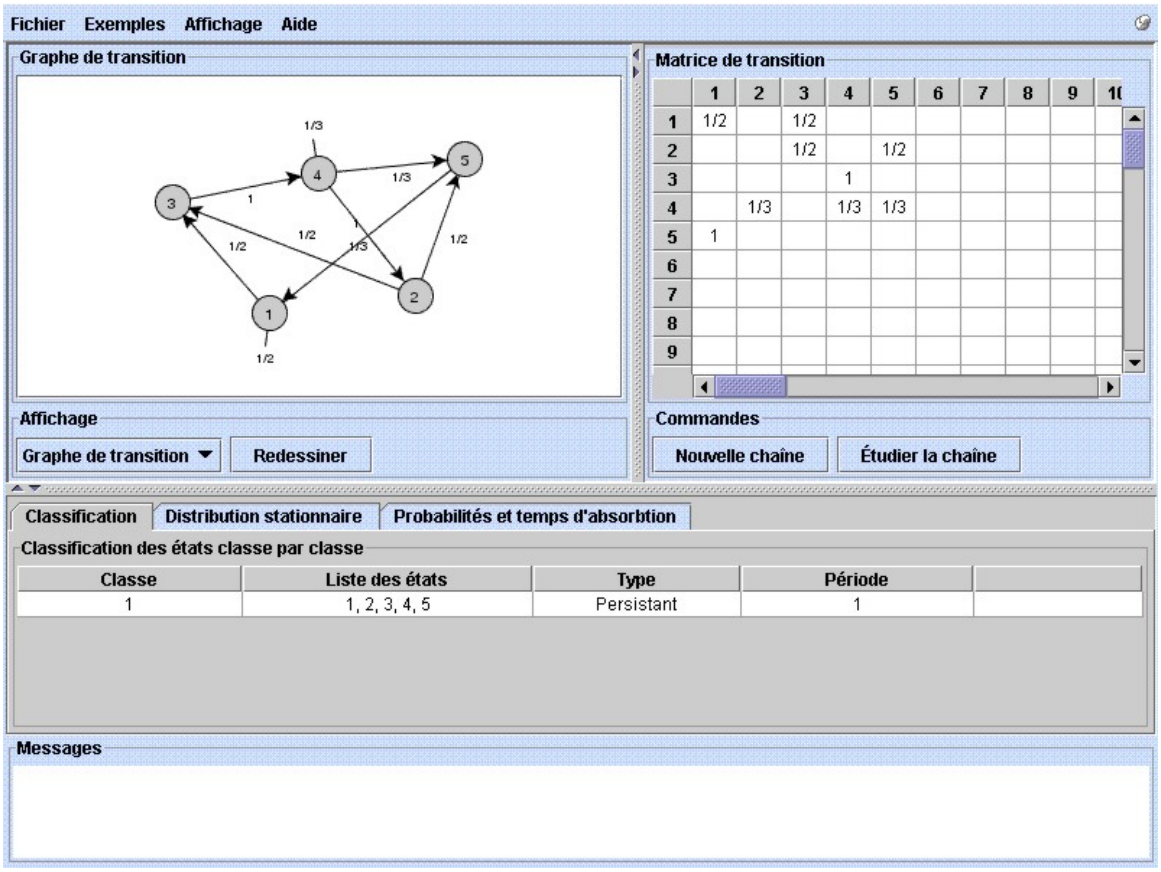


Fig. 70 : Appliquette DTCMA (Discrete Time Chain Markov Analyser) 1.2. *Source : Hêche, 2001*

Les applications des chaînes de Markov sont très nombreuses et variées avec, peut-être, un nombre d'études particulièrement élevé dans les domaines de la biologie, de la médecine (imagerie médicale, épidémiologie) et le traitement d'images et du signal au sens large du terme. Flamm et Turner (1994) proposent une méthode d'intégration stochastique de probabilités conditionnelles (images des états probables). Coquillard et Hill (1997) rappellent des applications à la simulation de l'occupation du sol des landes (Lippe et al, 1985) et proposent un modèle markovien concernant les incendies en forêt méditerranéenne. Logofet et Lesnaya (2000) discutent des possibilités des chaînes de Markov dans le domaine de la prédiction de dynamiques forestière et Balzter (2000) résume les facultés prédictives cette approche sur la base d'une vingtaine de modèles de Markov appliqués à des écosystèmes de type prairie en constatant des performances hétérogènes. Tucker et Arnand (2004) appliquent les chaînes de Markov, toujours sans leur composante spatiale, à la recolonisation et la restauration écologique en focalisant sur les dynamiques végétales. L'emploi des chaînes de Markov est une des voies empruntées pour la simulation de l'occupation du sol dans le cadre du programme LUCC (Nunes et Augé, 1999) qui repose, essentiellement, sur des données télédétectées. Les chercheurs du programme LUCC estiment pouvoir coupler les probabilités de transition markoviennes avec des données exogènes afin de socialiser le pixel. Ces informations supplémentaires, injectées au modèle, exprimeraient des hypothèses d'aménagement ou de développement afin de construire des scénarios d'évolution prospective. Enfin, plusieurs recherches soulignent les avantages d'un couplage de modèles déterministes et stochastiques (cf. entre autres Roman, 2004).

Les principales limites de l'approche markovienne résident, une fois de plus, dans leurs hypothèses de départ :

- L'indépendance vis-à-vis du temps (modèle sans mémoire). Dans la plupart des applications, il est impossible de prédire correctement l'état du système futur sur la base d'une seule information instantanée (principe des matrices de transition d'ordre 1).
- L'indépendance vis-à-vis de l'espace : comme dans le cas des modèles déterministes – et notamment leur branche analytique – l'espace n'est pas homogène. La répartition des individus modélisés influe fortement sur l'évolution du système. Cette constatation est symboliquement illustrée dans la figure 71 pour un cas d'un géosystème complexe à plusieurs espèces en concurrence. L'évolution future du point situé dans la zone herbacée dépend non seulement du comportement de celle-ci mais également de la dynamique de conquête de la zone forestière et d'arbres isolés. Les probabilités de transition des points de la zone herbacée ne sont guère indépendantes de leur localisation spatiale.

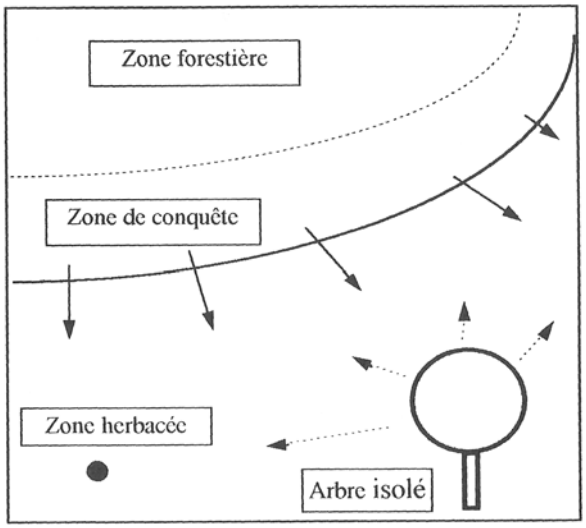


Fig. 71 : Effet spatial et conquête forestière. *Source : Hill et al., 1994*

Dans le schéma de Coquillard et Hill (1997), le dernier groupe est qualifié de simulations discrètes sans composante analytique : la simulation aléatoire (Monte Carlo), la simulation à événements discrets et les modèles à vie artificielle (automates cellulaires, intelligence artificielle, réseaux de neurones, …). Il s'agit d'un ensemble d'approches modélisatrices relativement modernes qui font souvent des emprunts (sous-modèles) aux deux grandes familles de modèles présentées et qui combinent fréquemment dans la pratique. Toutes ont la particularité de prendre en ligne de compte la répartition spatiale pour la simulation du comportement du système.

Simulation à événements discrets

Concernant la simulation à événements discrets, qui peut reposer sur une approche déterministe ou stochastique, il convient d'apporter quelques notions concernant la gestion du

temps. On part du principe que l'instant est un intervalle de temps pendant lequel la variable simulée ne change pas d'état. On appelle événements la succession d'instants précis auxquels un changement d'état de la variable peut se produire. Le nombre d'états possibles est fini. Ainsi le changement intervient uniquement à des instants discrets dans le temps qui reste une notion continue. Quelque soit l'approche choisie, toutes les simulations à événements discrets admettent le principe de causalité (un état ultérieur ne peut avoir d'impact sur un état antérieur) et de déterminisme (un état ultérieur peut être simulé à partir d'états antérieurs) (Zeigler et Sarjoughian, 2000). Placé dans le contexte géographique, Gadal (2000) parle d' « événement spatial » et souligne le phénomène bien connu de décalage temporel entre l'événement et sa palpabilité visuelle dans le paysage.
On distingue trois approches du temps discret dans la simulation à événements discrets (LGPP, 2002) :

- Par événements : un calendrier d'événements ou échéancier qui stocke les événements possibles et leurs dates d'occurrence. Un cas extrême est la variante de gestion par horloge divisant le temps en intervalles réguliers – un concept souvent utilisé dans des applications géosystémiques.
- Par activité : on liste les activités possibles (se nourrir, se reproduire, ..) et leurs caractéristiques (conditions, conséquences). L'ensemble est décrit sous forme de diagrammes de cycle – une variante couramment utilisée dans des applications industrielles.
- Par processus : les séquences d'événements similaires pour un type d'objets sont regroupées sous forme de processus. Le fonctionnement du système est décrit par des objets dynamiques (priorité, date d'occurrence, …) agissant sur les objets statiques (description des processus). Le haut degré d'interaction de cette forme de gestion du temporel exige une programmation se rapprochant du traitement parallèle … sur des ordinateurs séquentiels.

La simulation par événements discrets constitue une approche souple, focalisant sur les événements importants, s'adaptant aux échelles temporelles en jeu, mais – étant donné leur mise en œuvre généralement stochastique – présentent des résultats entachés de variance et dont la convergence des estimations nécessite des temps de calculs relativement importants.
Il est à noter que l'ensemble des modèles s'appuyant sur une approche discrète ont bénéficié de l'approche objet des langages de programmation orientées objet comme C++ ou Java (cf. entres autres : Bouzeghoub et al., 2000 ; Meyer et Jouvelot, 2000 ; Frihida et al. 2002 ; Libourel, 2003) – un concept étendu également à la structuration des bases de données et des projets SIG (Hugot, 1998). Cette approche orientée objet est également connue sous le nom de modèles d'acteurs qui se composent d'objets interagissant en parallèle (Agha et Rajendra, 1992 ; Rajendra et al., 1996). On note une forte similitude avec les modèles d'agents (cf. ci-dessous).

1.5. Des automates cellulaires aux réseaux de neurones : modèles faisant appel à l'intelligence artificielle

Sans vouloir nous livrer à une revue des définitions du terme d'intelligence artificielle (IA), retenons simplement que son objectif consiste à étudier et à construire des systèmes artificiels de traitement de connaissances par le biais de construction de programmes informatiques simulant des comportements humains ou modélisant des mécanismes complexes. Les

approches modélisatrices de simulation empruntant cette voie sont également qualifiées, par certains auteurs, de vie artificielle. Comparée à l'algorithmique classique qui doit prévoir tous les comportements des éléments et l'enchaînement des processus, existent des modèles faisant appel à l'intelligence artificielle, un domaine pour lequel on emploi aussi le terme de traitement automatique de l'information. Ils sont basés sur la connaissance qui est soit :

- Injectée sous forme d'une base de connaissances : système expert, automates cellulaires, système multi-agents qualifiés aussi d'intelligence artificielle distribuée (IAD)
- Apprise (processus d'auto-apprentissage) dans le cas de la neuronique et des systèmes multi-agents cognitifs et endomorphes.

La naissance du concept d'intelligence artificielle est très liée à l'informatique. Les premiers ordinateurs (autour de 1944) sont basés sur les concepts de Turing et de Von Neumann. Pour ne citer que deux références majeures, retenons la publication de Alan Turing (1950) *Computer machinery and intelligence*, considérée comme jalon fondateur de l'IA et les travaux déterminants de Marvin Minsky *Matter, minds and models* (1965) et *Society and mind* (1987).

A partir des années 1980, même si les racines méthodologiques remontent jusqu'au années 1940, de nouvelles approches modélisatrices pour la simulation de systèmes complexes dites à base individuelle ont été développées en biologie et en sciences sociales et humaines notamment. Elles ont en commun le fait que les interactions entre éléments ou individus du système prennent une place déterminante pour la simulation du comportement du système dans le temps. Cette approche fondée sur des composantes dotées d'une certaine autonomie, exigeant au tant que se peut un traitement parallèle des processus, est également qualifiée d'intelligence artificielle.

Automates cellulaires

Les automates cellulaires (AC) s'appuient sur les travaux de Ulam et Von Neumann (1963), Von Neumann (1966), Burks (1970), Conway (publié par Gardner, 1970) et Gardner (1971). Un automate cellulaire est un système dont les éléments interagissent localement selon des règles simples aboutissant à un comportement systémique dynamique complexe et dont l'espace, le temps et les états sont discrets (Wolfram, 1985 ; Jen, 1990). Langlois et Philipps (1997) retiennent dans leur définition deux caractéristiques essentielles :

- Les propriétés structurelles d'un AC. Elles décrivent la topologie du réseau de cellules (espace discret). La plupart des mises en œuvre se basent sur une approche raster à deux dimensions avec des pixels carrés mais il est envisageable de concevoir des réseaux à une dimension (linéaire) ou à trois dimensions (volume), voire un réseau dans un espace à n dimensions. Les propriétés topologiques du réseau dépendent également de la forme des cellules – généralement carrées ou hexagonales – qui renseigne sur le nombre de connexions directes (voisinage ou contiguïté). Comme dans les techniques de filtrage classique (cf. partie I, chapitre 2, § 2), la gestion des bords de la matrice a une importance cruciale. Une solution élégante est de concevoir la matrice torique : elle boucle sur elle-même. L'implémentation des AC dans les SIG interdit souvent la conception torique. On peut alors se contenter d'un effet miroir

(prolongement auto reproductif des cellules en bordure) ou inscrire la matrice active dans un environnement plus vaste permettant des interactions avec l'extérieur. Cette solution est fréquemment retenue dans les développements de projets SIG visant la gestion du risque d'incendie. Finalement on distingue entre la prise en compte du voisinage direct et celle d'un environnement plus vaste (voisinage étendu). Dans ce dernier cas on parle d'un voisinage étendu (pondéré par la distance ou divisant l'espace en zones d'égale propriété) et on qualifie les AC d'automates étendus.

- Les propriétés fonctionnelles d'un AC sont décrites, d'une part, par la liste d'états (discrets) qu'une cellule peut avoir et, d'autre part, par les règles de transition, appelées aussi règles d'évolution de l'automate. Il s'agit d'un ensemble plus ou moins complexe de modalités déterministes déterminant l'état qu'une cellule peut revêtir au cours de la simulation (cf. Mezzadri-Centeno, 1998).

Ces caractéristiques peuvent être illustrées par le jeu de la vie de Conway (Garner, 1970). La structure de cet ancêtre des AC est une matrice carrée torique à pixels carrés. Les cellules peuvent prendre deux états et les règles de transition sont au nombre de deux (Université du Maine, 2004 qui propose également ce jeu en ligne, cf. fig. 72):

- Une cellule morte (0) à l'étape n-1 et ayant exactement 3 voisins sera vivante à l'étape suivante (naissance liée à un environnement optimal).
- Une cellule vivante à l'étape n-1 et ayant 2 ou 3 voisins sera maintenue à l'étape n sinon elle meurt (destruction par désertification ou surpopulation).

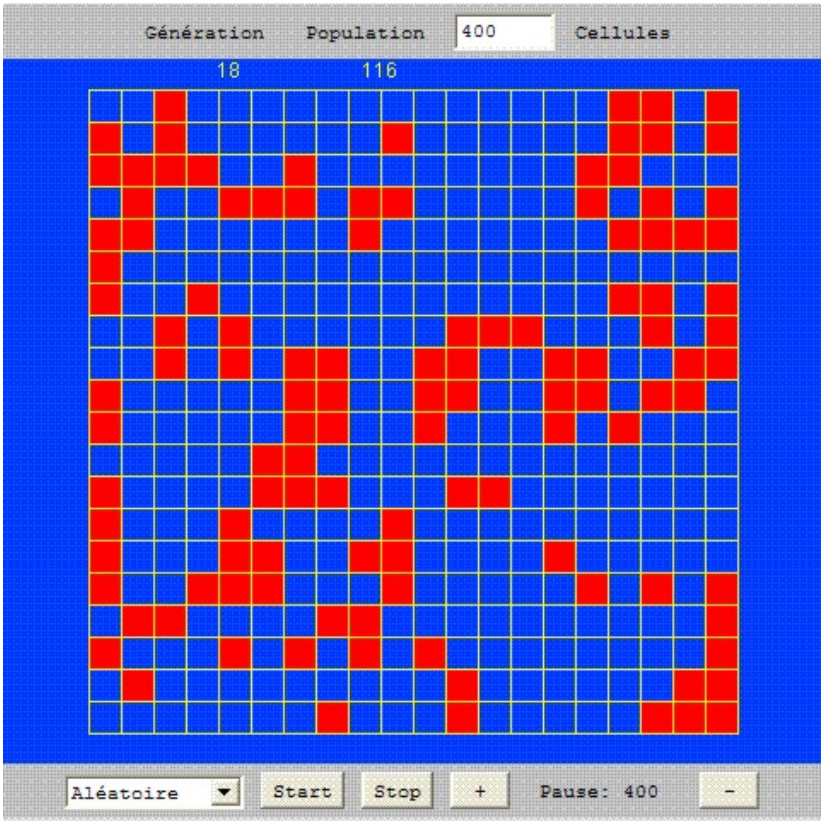


Fig. 72 : Un automate cellulaire simple : le jeu de la vie. *Source : Université du Maine, 2004*

Le système est initialisé par un générateur de nombres pseudo-aléatoires.

Le trait essentiel des AC réside dans l'interaction des cellules. Celle-ci demande, au moins en théorie, un traitement parallèle des processus élémentaires (Tosic et Agha, 2003, 2004a, 2004b). Sur les ordinateurs séquentiels le parallélisme est simulé soit par activation synchrone (mémorisation de l'état de tout le système à un pas de temps donné et évaluation de toutes les transitions appliquées ensuite au pas de temps suivant), soit par activation asynchrone (traitement séquentiel des transitions en figeant les autres cellules). Comme c'est le cas dans les filtrages, on emploie une seconde matrice qui accueille les résultats l'état de la matrice à t_{+1}.
La modélisation se complique pour des applications impliquant différentes catégories de cellules (individus d'espèces différentes) dont l'évolution aboutit à des conflits d'objectifs. Cette compétition de colonisation d'espace nécessite un arbitrage quelle que soit l'architecture de la machine : tirage aléatoire ou introduction de probabilités agissant sur les catégories, l'état de la cellule ou encore l'environnement en cas d'AC étendus. On comprend aisément qu'un emploi quelque peu réaliste des AC génère des calculs massifs d'où les tentatives d'optimisation focalisant notamment sur les cellules dont l'environnement a changé au cours de l'itération précédente (Zeigler, 1976).

Les AC ont trouvé de nombreuses applications et il serait vain de vouloir donner dans ce cadre un aperçu représentatif. Dans le champ de la géographie de l'environnement on note par exemple les publications de Elmozino et Lobry (1997) et Dubé et al. (2001) portant sur la simulation en foresterie, de Franc et Sanders (1998), Jacewicz (2002) et Wu et Marceau (2002) en écologie.
Un autre domaine particulièrement investi par les AC est celui de la géographie urbaine. L'ouvrage de Langlois et Philipps (1997)[12] y est consacré. Les auteurs citent d'abord les précurseurs : entre autres Forrester (1969) et, dans un registre différent, Tobler (1979). Dans ce contexte citons également l'ouvrage de Pumain et al. (1989) sur l'autoorganisation des villes. S'appuyant sur les modèles théoriques d'avant-guerre de la structure urbaine (modèle concentrique de Park et Burgess, 1925 ; modèle sectoriel de Hoyt, 1939 ; modèle polycentrique de Harris et Ullman , 1945) et des modèles plus récents (modèle de la rente foncière de Alonzo, 1964 ; modèle économique à base des secteurs d'emploi de Lowry, Webber, 1984), les auteurs présentent dans un premier temps différents modèles urbains (Batty et Longley, 1994 ; Portugali et Benenson, 1994 ; Xie, 1996 ; White et Engelen, 1997). On peut y ajouter la publication de Batty et Xie (1997). La dynamique urbaine est simulée, entres autres, par Batty et Xie (1999) et Yeh et Li (2001). Engelen (2003) donne une bibliographie actualisée pour ce champ de recherches.
Entres autres Park (1994) et Dragicevic et Marceau (2000) ont étudié la possibilité d'intégration des AC dans les SIG qui, grâce notamment à la nature de la matrice utilisée, semble être plutôt aisée.
Concernant le classement des AC parmi les approches modélisatrices dites d'intelligence artificielle, Langlois et Philipps (1997) ont un jugement nettement plus nuancé que Coquillard et Hill (1997) pour qui les AC font partie de l'IA. Les premiers rapprochent notamment les AC dits adaptatifs de l'IA dans la mesure où l'injection des mécanismes d'apprentissage aux règles de transition stochastiques leur permet une certaine évolution (à ce sujet voir les travaux de Lee, entre autres Lee, 2004). D'autres auteurs nuancent (cf. Villemin, 2003) le degré d'appartenance des AC selon le processus d'élaboration des connaissances : injectées ou apprises.

[12] Langlois et Philipps (1997) présentent notamment deux modèles opérationnels : SimUrb et ParaCell.

Sans porter un jugement sur la performance des AC en général, on peut noter leur succès depuis les années 1990 dans des nombreuses applications. Les limites résident en particulier dans les ressources de mémoire et de processeurs et la généralisation du modèle, compte tenu de la complexité de programmation des AC évolués – une remarque qu'il convient cependant d'étendre à tous les modèles performants.

Multi-agents

La modélisation et simulation multi-agents – également nommées intelligence artificielle distribuée (IAD) – sont caractérisées par une individualisation des composantes du système en un ensemble d'éléments en interaction.
Les agents (éléments systémiques individualisés) sont autonomes et organisés selon des règles sociales, décrivant leur comportement potentiel, ce qui les distingue de l'approche d'acteurs selon Coquillard et Hill (1997). Selon Ferrand (1997) les agents sont dotés d'un état (qualitatif ou quantitatif) et des transitions (évolution dans le temps discret). Les interactions simultanées (approche parallèle) se produisent entre eux (interactions internes ou sociales) et avec des stimuli extérieurs (introduction de données, processus de l'environnement du système) : les interactions externes ou perceptives.
La structuration des agents en société décrit leur organisation basée sur des règles de comportement et des critères téléonomiques (intention, finalité). Celle-ci peut être explicite (description préalable des règles sociales) dans le cas d'agents réactifs ou émerger au cours de la simulation (processus d'auto-apprentissage nécessitant une mémoire et une connaissance des autres agents). A ce sujet Coquillard et Hill (1997) parlent de systèmes d'agents cognitifs (cf. Ferber, 1995 et O'Hare et al., 1996 ; Franc et Sanders, 1998).
La conceptualisation des systèmes multi-agents est décrite notamment par Briot et Demazeau (2001). L'implémentation informatique se fait par l'intermédiaire de langages de programmation objet. Un certain nombre de bibliothèques de scripts comme Cormas (Bousquet, 2001), Phoenix (Savall et al. 2001) ou de prototypes de logiciels comme Swarm (SDG, 2004) ou encore Stratège développé au laboratoire COGIT (Conception Objet et Généralisation de l'Information Topographique) de l'IGN sont disponibles aujourd'hui. Comme les automates cellulaires, les modèles multi-agents font également l'objet de recherches dans le cadre de programmes internationaux destinées au global change, dont LUCC (Parker et al., 2001).
Les modèles multi-agents servent aussi bien à la simulation de systèmes complexes (Savall et al., 2001), avec possibilité de scénarios d'intervention ou d'événements, qu'à l'évaluation multi-objectifs (EMO) par attribution de contraintes et d'objectifs concurrents aux agents.

Trois exemples permettent d'illustrer les fonctionnalités des modèles multi-agents.

Comparaison de deux modèles multi-agents : réceptif et cognitif

Bousquet et Gautier (1999) discutent des avantages réciproques des deux variantes, l'une réceptive, l'autre cognitive, décrites précédemment par Coquillard et Hill (1997) à propos de la modélisation de la dynamique spatiale. Ils considèrent un espace théorique pour y simuler la conquête agricole. L'espace (matrice raster) dans lequel cette simulation a lieu est conçu, d'une part, comme support, dans l'autre cas comme agent.

Bousquet et Gautier (1999) appellent *acteur* la première variante. L'accent est mis ici sur les éléments ou agents. Il s'agit de pixels ou agrégats de pixels dans le sens de pseudo-objets. Concrètement Bousquet et Gautier distinguent deux catégories d'acteurs : les agriculteurs et leurs troupeaux. Ces agents entretiennent des interrelations avec les ressources localisées dans l'espace. En ce sens l'espace sert de support pour le déroulement de la simulation. Nous sommes donc en l'occurrence d'une multitude d'agents élémentaires que l'on peut qualifier d'agents réceptifs selon la typologie de Coquillard et Hill (1997).
Dans le second modèle, les agents sont des agrégats spatiaux pour lesquels des règles de comportement sont définis. Ces agents sont les maisons, champs, parcours de pâture et la forêt « dont la dynamique est liée au comportement des acteurs qui gèrent les ressources qu'elles contiennent ». L'accent est mis sur les entités spatiales agrégées (village, champ, forêt, savane) formant des classes d'objets. L'organisation spatiale évoluant au cours de la simulation est ici approchée comme produit des interactions entre agents, et non comme simple support. Ce modèle ne comporte que peu d'agents mais ceux-ci sont dotés d'une connaissance supérieure. On peut les rapprocher des agents cognitifs décrits par Coquillard et Hill (1997).
La mise en œuvre des deux modèles se fait avec un environnement de simulation multi-agents orienté objet nommé Cormas (Common Pool resource and muli-agent systems) développé au CIRAD (Bousquet et al., 1998 ; Bousquet, 2001). La comparaison des deux modèles se fait uniquement au niveau méthodologique – une validation étant impossible étant donné l'espace fictif. Les auteurs insistent sur le principal avantage du modèle spatial qui est leur lien aisé avec les SIG. Ils déplorent cependant, au moins dans la version publiée il y a cinq ans, le nombre restreint d'interactions qui est lié directement à celui d'agents, également présents en petite quantité.

Généralisation de données topographiques urbaines

Ruas (1999a, 1999b, 2002) propose une simulation multi-agents appliquée à la généralisation de données urbaines sous forme topographique. Elle part des besoins de généralisation en cartographie et spécialement en cartographie topographique numérique. Ruas (1999b) qualifie son modèle « reposant sur des concepts d'autonomie, de contraintes et de représentation de différents niveaux d'analyse ». Le concept d'autonomie, caractéristique de l'approche multi-agents se base sur les travaux de Ferber (1995) et stipule que chaque configuration génère sa propre généralisation. Les contraintes, divisées en deux familles (modification et maintien) sont des propriétés explicitées à satisfaire. Nous nous situons donc clairement dans un contexte multi-objectif concurrentiel. Les différents niveaux d'analyse sont nécessaires au processus de généralisation distinguant les objets élémentaires (maison), les groupes d'objets (îlot urbain) et les populations d'individus (ville) : micro, méso et macro. Son modèle est centré sur les situations méso, résultant des processus élémentaires, pour lesquelles des règles géographiques de regroupement sont établies. Notons dans contexte la contribution de Sanders (1999) à la question quel niveau privilégier. Elle illustre son propos à travers la mobilité et la dynamique des populations que l'on peut modéliser au niveau micro (centré sur l'individu et supposant un comportement spécifique) ou méso (comportement homogène de groupes de population). Sanders (1999) suggère deux pistes. D'une part, le choix de l'échelle - et des qualités du modèle – peut s'orienter selon le contexte « macro » (politiques d'aménagement, sociale, etc.), variable selon les pays. D'autre part, elle préconise un couplage des deux approches – une piste également suggérée par le CNRS dans son appel d'offres ELICCIR (Emergences – de L'Individu au Comportement Collectif : Interactions et représentations) en SHS (2003) et évoqué par Gadal (2003).

Ruas (1999a) insiste sur les spécificités de la généralisation à prendre en compte dans le modèle. Ainsi, le processus de généralisation doit également être contextuel afin de détecter les formes rares à maintenir sachant qu'elles qualifient un espace. Ruas illustre son modèle en prenant appui sur un îlot urbain La figure 73 illustre le processus de généralisation en étapes.

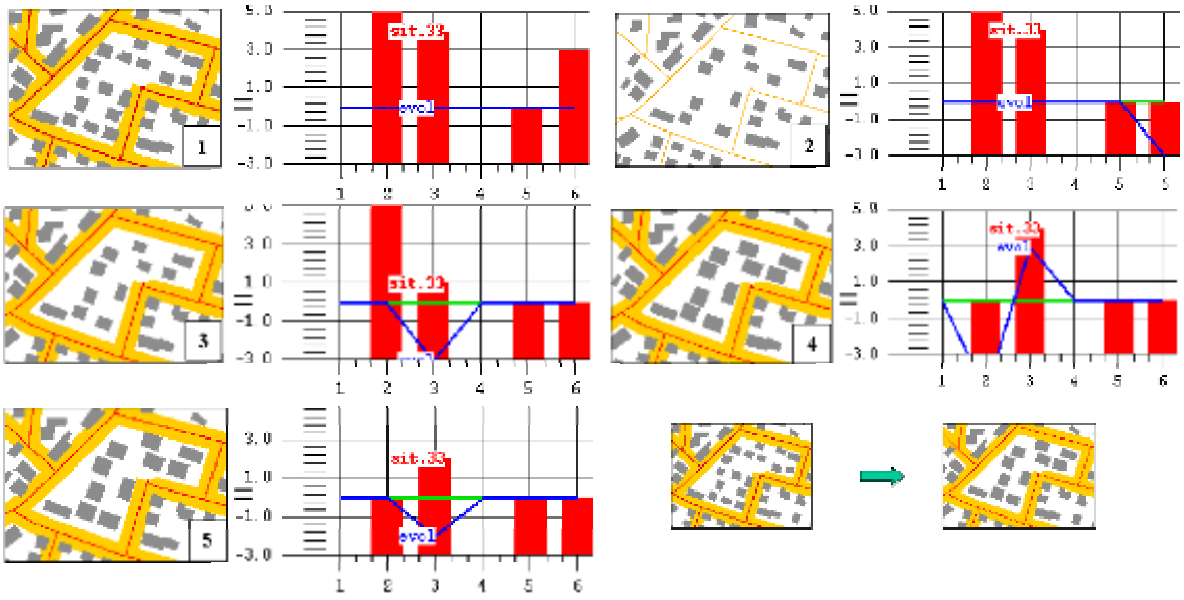


Fig. 73 : Processus de généralisation par simulations multi-agents en étapes.1) Résolution de la densité du bâti souhaité. 2) Déplacement des bâtiments pour satisfaire à la contrainte de proximité. 3) Suite à la résolution des conflits méso, auto-généralisation des bâtiments de l'objet îlot urbain. 4) Nouveau déplacement de l'objet suite à la dilatation. 5) Requalification de la situation. *Source : Ruas, 1999b*

Ruas (1999b) qui, dans sa publication, ne fait pas état d'une validation de son modèle, conclut en insistant lourdement sur les insuffisances analytiques des logiciels SIG disponibles qui appréhendent les données géographiques en tant qu'entités indépendantes (objets) alors que seule leur association caractérise l'espace. Elle propose de raisonner en groupes d'objets (méso), préservant ainsi leurs propriétés structurelles (forme, densité, répartition) pour l'étude desquelles « très peu d'outils d'analyse ont été développés dans les SIG ». Nous partageons partiellement cette critique. L'approche conceptuelle de la représentation des phénomènes géographiques de Ruas est explicitement vectorielle. S'il est admis que les SIG vectoriels utilisent généralement des structures de données préservant la topologie, leur capacité d'analyse spatiale est, dans la plupart des programmes, limitée et reste loin derrière les possibilités qu'offre la représentation en mode image (cf. partie I, chapitre 2, § 2) qui, par le biais des pseudo-objets, dispose d'un pont vers un traitement orienté objet.

Simulation paysagère multi-agents cognitifs et téléonomiques

Nous allons illustrer les capacités des modèles multi-agents à travers un dernier exemple : la simulation paysagère prenant en compte les relations sociales (Poix et Michelin, 2000). Les auteurs prennent appui sur l'évolution de l'occupation du sol d'une commune de la chaîne des Puys, préalablement étudié (Michelin, 1995), et du système MAGE (Poix, 1998) de simulation à événements discrets pour construire un modèle multi-agents de simulation de dynamiques de la végétation sous influence des pratiques agricoles. Poix et Michelin insistent

d'abord sur la double signification paysagère – réalité matérielle et image perçue et porteuse de sens – porteuse de conflits dans la mesure où la modification des pratiques d'utilisation du sol peut aboutir à des changements paysagers non intentionnels et imprévus. Le paysage est appréhendé en tant que reflet spatialisé des pratiques sociales auxquelles il réagit avec inertie.
Ils utilisent des données historiques afin de pouvoir valider leur modèle qui est doté d'agents cognitifs et téléonomiques représentant les différents types d'exploitations agricoles (fig. 74). Ces quatre agents, rassemblant une centaine d'éléments se concrétisent dans l'espace par le contrôle des parcelles agricoles.

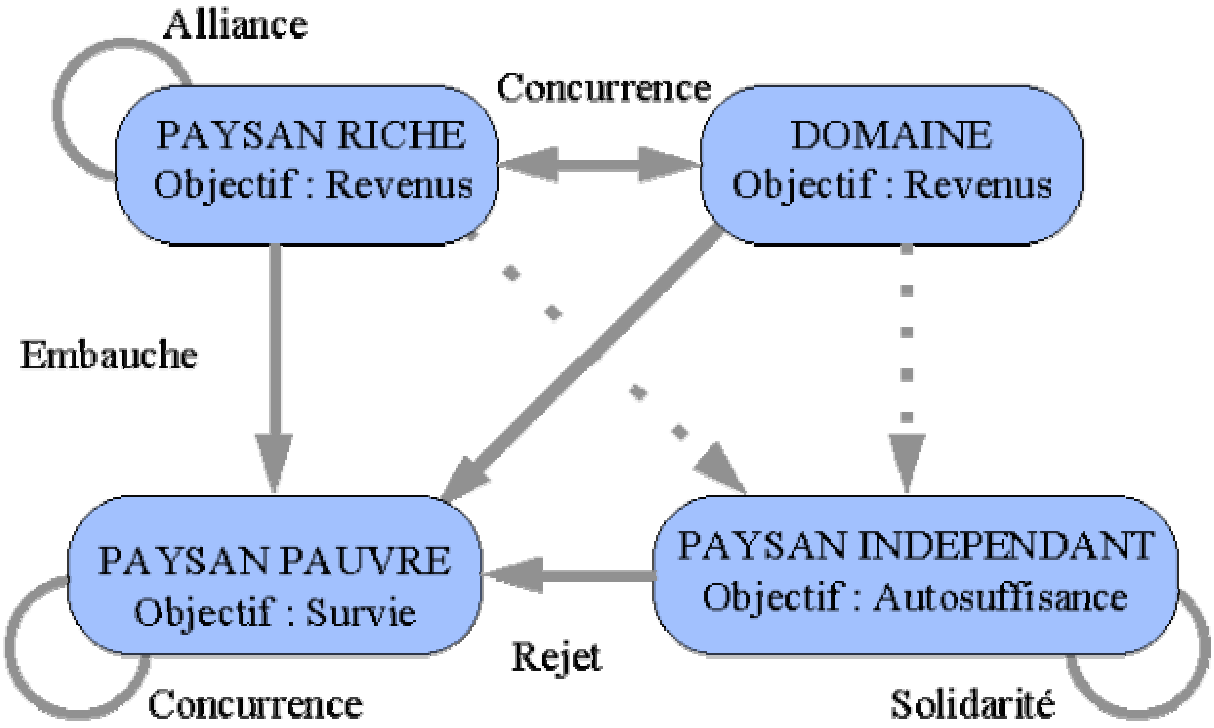


Fig. 74 : Schéma des interactions entre agents. *Source : Poix et Michelin, 2000*

Pour les auteurs il s'agit, par la suite, de calibrer et de valider leur modèle, qui à la date de publication ne présente pas de résultats spatialisés sous forme cartographique afin de le rendre opérationnel dans le cadre de la gestion de l'espace.
Les limites des modèles à base multi-agents résident selon Ferrand (1997) dans les domaines suivants : le temps de calcul est élevé, la validation difficile à cause d'un manque de traçabilité. Coquillard et Hill déplorent, en 1997, un manque de recul et de validation pour la compétition spatiale des agents en dehors d'un recours à des règles stochastiques en ce domaine.

Parmi les autres applications significatives de la méthode, citons les travaux de Sanders sur la durabilité des systèmes de peuplement (Sanders, 1997).

Système expert

On peut qualifier un programme informatique qui simule l'intelligence humaine de système expert. Il est composé d'une base de connaissance (connaissance injectée) qui à la particularité de pouvoir s'enrichir de par les simulations exécutées et la communication

homme-machine, d'un ensemble de règles de décision (procédures de raisonnement) et d'un moteur d'inférence permettant d'appliquer les règles de décision à la base de connaissances. Ce dernier étant l'élément décisif quant à l'efficacité du système. Selon HyperGeo (2004) son emploi en géographie permet une aide à la décision grâce à ces facultés d'intégrer des variables de nature scalaire différente dans la base de connaissances, de structurer logiquement les connaissances pour établir un modèle et de proposer des simulations prospectives sans pour autant spatialiser les phénomènes simulés. Pour cette raison nous n'abordons que sommairement ce domaine qui est cependant, couplé à d'autres modèles, un élément intéressant pour la simulation prospective de phénomènes spatiaux.
Nombre d'auteurs insistent sur l'étroitesse du champ d'application des systèmes experts (Villemin, 2003). Ainsi peuvent-ils donner de bons résultats pour des domaines spécialisées (détermination botanique, diagnostic industriel), mais échouent généralement pour la simulation de phénomènes de la vie de tous les jours, ce que l'on appelle le sens commun, comme par exemple les déductions du type : *si je rapporte le plateau au restaurant universitaire, j'ai terminé le repas* ou encore *les gens préfèrent le soleil à la pluie*.
La voie du couplage d'un système expert à d'autres modèles traitant des données spatiaux est empruntée, à titre d'exemple, par le CIRAD en collaboration avec le UNHCR (Haut Commissariat aux Réfugiés) pour un projet visant à minimiser l'impact environnemental dans les zones d'accueil de réfugiés (CIRAD, 2001) et devrait constituer, à terme, un outil d'aide à la décision opérationnel. A ces fins, les chercheurs associent des procédures de traitement d'image satellitale, d'analyse spatiale sous SIG et un système expert (cf. fig. 75).

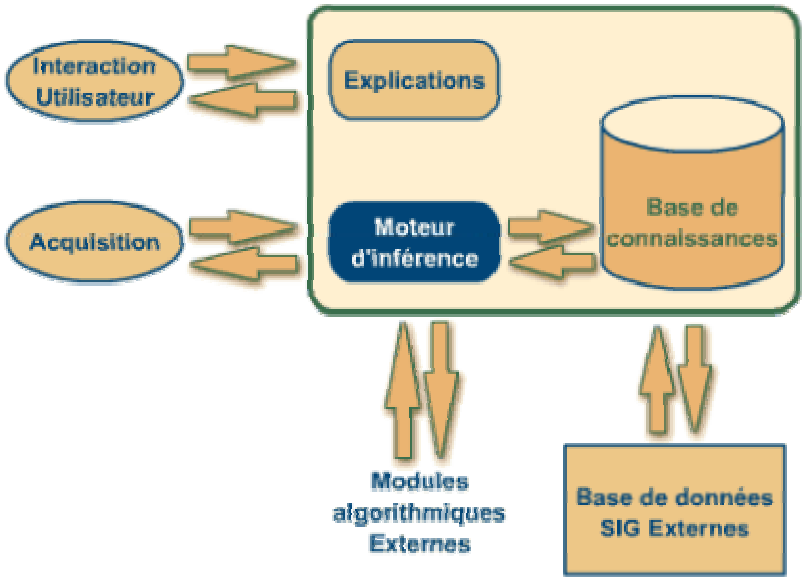


Fig. 75 : Couplage d'un système expert avec un SIG. *Source : CIRAD, 2001*

Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones (RN) s'inspirent du fonctionnement du cerveau humain. Ils sont caractérisés par un traitement parallèle de l'information et leur capacité d'apprentissage automatique ce qui les classe parmi les approches dite d'intelligence artificielle. La plupart des réseaux neuronaux sont à temps discret et synchrone. Ils visent à imiter les facultés des

réseaux neuronaux biologiques dans les domaines de la reconnaissance de formes, du traitement du signal, de la mémorisation et de la généralisation. Des applications pour la prédiction de séries chronologiques se multiplient les dernières années (cf. entre autres : Bishop, 1995 ; Parlitz et Merkwirth, 2000 ; Lai et Wong, 2001).
Touzet (1992), connexionniste, définit les RN artificiels comme « des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau ». Ils reposent sur une architecture de réseau (cf. ci-dessous) se comportant comme une boîte noire qui exploite une base de données matérialisant les connaissances (base d'apprentissage). L'apprentissage du réseau constitue une phase de paramétrage du réseau dans le but de l'optimiser. Pour cela les vecteurs de données de la base d'apprentissage sont liés au réseau qui subit des pondérations afin d'optimiser l'apprentissage. Une fois que l'algorithme est stabilisé, on propage les vecteurs de la base de tests à travers le réseau pour la simulation.
La racine des RN est généralement attribuée dans les travaux de James (1890) introduisant le concept de mémoire associative, repris en tant que modèle d'apprentissage des RN (loi de Hebb, 1949). En 1943 Culloch et Pitts démontrent théoriquement le fonctionnement logique de neurones formels. Rosenblatt (1958) construit un premier neuro-ordinateur, le Perceptron, appliqué à la reconnaissance de formes, amélioré en par Widrow (1960). L'emploi des RN a véritablement décollé vers la fin des années 1980 – époque à laquelle le rapport puissance / prix des ordinateurs devenait favorable à ce type d'applications complexes.
La fig. 76 compare l'architecture d'un neurone biologique à sa version mathématique. On remarque quelques règles fondamentales. Un neurone a plusieurs entrées (neurones amont) dont le poids exprime la force de connexion. Chaque neurone est doté d'une fonction de transfert (seuil d'activation) alimentant une sortie qui peut se ramifier pour constituer des entrées pour les neurones aval.

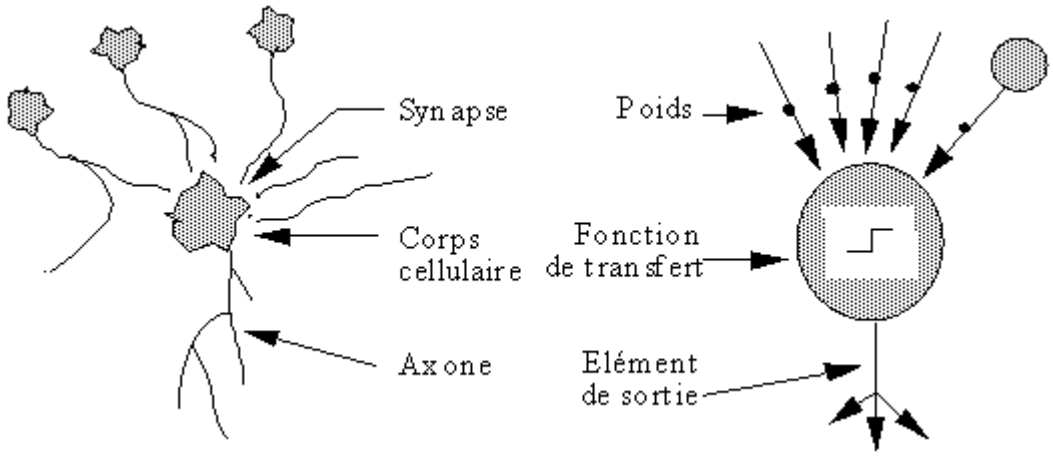


Fig. 76 : Architectures comparées d'un neurone biologique et artificiel. *Source : Touzet, 1992*

La fonction de transfert peut être binaire comme pour un neurone biologique (fonction à seuil) ou continue ce qui permet une variation de la force du signal transmis.

La loi de Hebb (1949) stipule que « Lorsqu'un axone de la cellule A est suffisamment proche pour pouvoir exciter la cellule B et qu'il prend part de manière répétitive ou persistante à cette excitation, alors on doit trouver soit un phénomène de croissance, soit un changement métabolique dans l'une ou l'autre des cellules tel que l'efficacité de la cellule A pour exciter B doit être accrue. ». Ainsi la synapse reliant A à B facilite la transmission de l'information lorsque A et B sont excités simultanément sinon elle inhibe la transmission. Dans les réseaux neuronaux artificiels la synapse est affectée d'un poids qui varie durant la phase d'apprentissage du réseau. Nous nous situons alors dans le cas de figure d'un apprentissage supervisé.
La topologie du réseau résulte de la structure d'interconnexion des neurones. La topologie simple de Hebb consiste en un réseau à deux couches (entrée, sortie) où tous les neurones d'entrée sont connectés à tous les neurones de sortie (mémoire hétéro-associative linéaire).Touzet (1992) donne un aperçu de la variétés des topologies de réseau. Une structure d'interconnexion fréquemment utilisée est le réseau multi-couches ou perceptron (fig. 77).

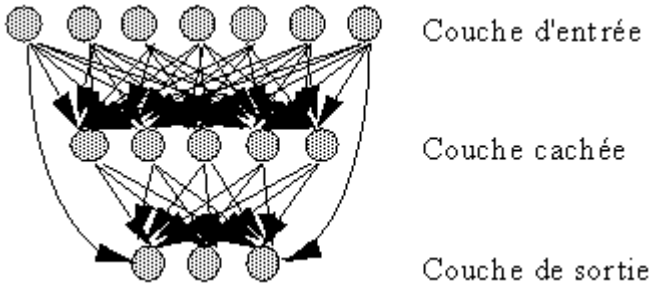


Fig. 77 : Perceptron ou réseau multi-couches. *Source : Touzet, 1992*

Cette topologie se caractérise par le fait qu'il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et que les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales. En général chaque neurone d'une couche amont est connecté uniquement à tous les neurones de la couche suivante. Cette topologie introduit la notion de sens de parcours de l'information au sein d'un réseau et qualifie la première couche de couche d'entrée et l'ultime de couche de sortie. La ou les couches interposées ne sont pas en contact avec l'environnement ; on les nome couches cachées.
Cette topologie est utilisée depuis longtemps et depuis les années 1960 en statistique (Davalo et Naim, 1969).
Au sujet de la topologie des réseaux Touzet (1992) constate des limitations importantes comparées au fonctionnement du cerveau humain qui résident dans la limitation du nombre de connexions par neurone, le nombre comparativement extrêmement réduit de neurones et la structure d'interconnexion elle-même simplifiée.
Nous allons approfondir le fonctionnement des réseaux neuronaux, et notamment la phase cruciale d'apprentissage, et discuter de leurs performances dans le contexte de nos propres recherches (chapitre 3, § 1).
Comparé aux autres approches l'emploi des réseaux neuronaux en géographie semble être encore à ces débuts. On pense aux travaux du CRT (Centre de recherche sur les transports) de l'Université de Monréal mais aussi à leur application environnementale (Houet, 2002) en télédétection ou encore les travaux de Coulialby et al. (1999) dans le domaine de la prévision hydrologique.

1.6. Modèles à logique floue

La logique floue (fuzzy logic) peut être introduite en tant que élargissement de la logique conventionnelle booléenne ou binaire afin de gérer les situations non binaires ou, plus exactement, celle de la vérité partielle. Tel est le cas si l'évaluation logique aboutit à un résultat situé entre entièrement vrai et entièrement faux exprimé sur une échelle quantitative (fig. 78). De ce point de vue le concept est comparable à la géométrie fractale qui nuance la géométrie classique en introduisant des nuances entres les dimensions classiquement entières.
L'origine du concept de la logique floue est attribuée à Zadeh avec sa théorie des sous-ensembles flous (1965) et la théorie des possibilités (1978). La première théorie débouche sur une fonction d'appartenance (cf. fig. 78) ; la seconde sur une fonction de possibilité associée à un événement. La logique floue est très proche du processus de la pensée humaine quotidienne. Elle trouve son emploi notamment dans le cadre de problèmes maquées par une connaissance lacunaire et ou incertaine (Bouchon-Meunier, 1995, Dragicevic et al., 2000) ou encore en tant qu'interface entre un niveau expert et un niveau utilisateur non expert comme c'est le cas dans les IHM (interface homme-machine).

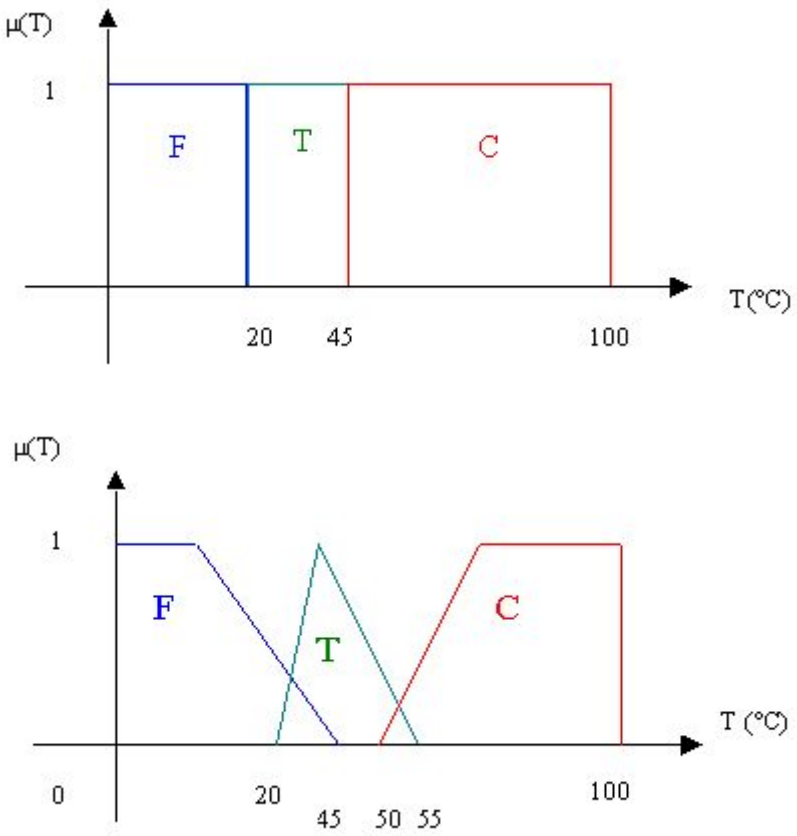


Fig. 78 : Théorie des sous-ensembles (fonction d'appartenance) en logique booléenne (en haut) et logique floue (en bas). *Source : Gadrat, 2004*

La théorie de possibilités se concrétise dans la commande floue (fig. 79). Les variables réelles sont traduites en variables floues selon des fonctions d'appartenance (fuzzification). Celles-ci sont traitées par un moteur d'inférence (alimenté par une base de règles) qui produit des

variables floues de sortie sur la base d'une fonction d'appartenance. La défuzzification en extrait une variable réelle.

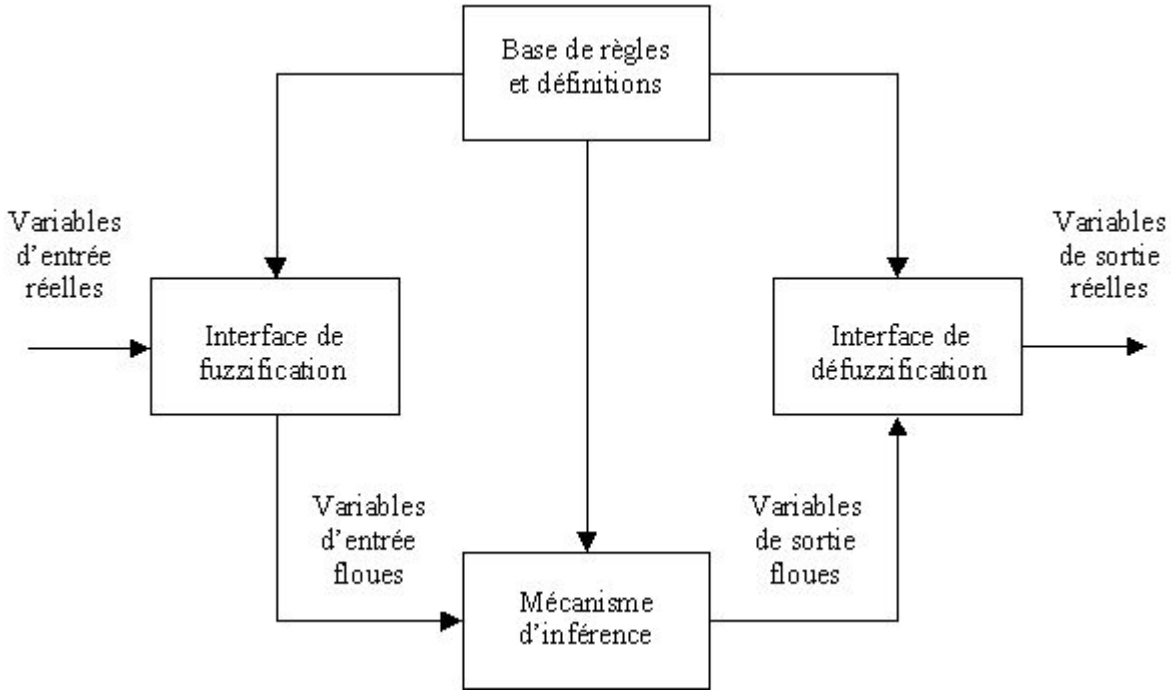


Fig. 79 : Principe de la commande floue. *Source : Gadrat, 2004*

Le moteur d'inférence utilise des règles d'inférence pour relier les variables floues d'entrée aux variables floues de sortie. Ces règles, définies par le modélisateur, utilisent des opérateurs logiques flous ET, OU, NON dont le signification diffère de la logique booléenne (cf. tab. 1) qui peuvent être combinés.

Opérateur	Opération sur le degré de vérité des variables
ET	minimum
	produit
OU	maximum
	valeur moyenne
NON	complément à 1

Tab. 1 : Opérateurs de la logique floue et degré de vérité (fonction d'appartenance). *Source : selon EIAJ, 2004*

Tong-Tong (1995) et l'EIAJ (2004), parmi d'autres, donnent une introduction à cette technique.

Parmi les recherches en modélisation entreprise au GEODE UMR 5602 CNRS, citons deux réalisations en collaboration avec l'IRIT (Institut de recherche en informatique de Toulouse) UMR 5505 CNRS. Il s'agit d'abord d'un travail intéressant de Vidal et Saint-Joan (1997) qui combine les systèmes experts flous et la morphologie mathématique pour caractériser les dynamiques spatio-temporelles d'un massif forestier pyrénéen débouchant sur des résultats spatialisés.

Les auteurs combinent ici leur expérience de modélisation antérieure (Saint-Joan, 1996 ; Vidal, 1996). Sur la base de trois photographies aériennes (1942, 1962 et 1993), ils classent l'espace étudié de manière binaire en forêt, non-forêt. Suite aux croisements opérés sur ces images booléennes ils définissent une typologie des évolutions selon les critères forme et surface. Celle-ci sert à appliquer à l'image la plus récente une suite de filtres morphologiques (cf. Robin, 1992 ; Voiron, 1995) du type érosion/dilatation et ouverture/fermeture afin d'extrapoler la situation à l'horizon de 20 ans (2013). Cette simulation est ensuite enrichie de critères (altitude, distance, dynamique, extension et – surtout – les brûlages dirigés) qui constituent la base de règles d'inférence lors du couplage avec le système expert flou. Les auteurs insistent sur la valeur expérimentale du modèle qui devrait être affiné et validé mais qui constitue une démarche intéressante dans la mesure où le modèle est évolutif et pourrait ainsi générer des scénarios.

Une seconde étude novatrice, menée également avec la participation du GEODE UMR 5602 CNRS était entreprise par Selleron et Mezzadri-Centeno (2002) appliquant la logique floue à la simulation prospective en contexte de front pionnier tropical.
Cette approche se base sur les recherches doctorales de Mezzadri-Centeno (1998) s'inscrivant dans le champ de la modélisation spatio-temporelle et de Selleron (1995) en télédétection appliquée à la dynamique des fronts pionniers.
La modélisation se base sur quatre images satellitales dont trois (1975, 1987, 1989) sont utilisées pour initialiser le modèle ; la quatrième date (1994) sert à la validation de la première d'une série de projections. Toutes les images ont été réduites par classification à des cartes binaires : forêt, non-forêt.
La méthode d'ajustement des données utilise une courbe de tendance basée sur la régression linéaire. Elle sert à déterminer un modèle de prédiction globale. La logique floue est employée pour le calcul de deux coefficients d'évolution (tendance régressive ou progressive) pour chaque pixel – les sous-ensembles flous. Les auteurs notent que la logique floue permet une prédiction reconnaissant le caractère plus ou moins marqué des mutations passées et qu'elle autorise de prendre en compte des facteurs exogènes. Dans leur modèle les auteurs n'introduisent qu'un seul critère exogène, celui de la distinction entre forêt paysanne et forêt industrielle qu'ils implémentent sous forme de masque géométrique en centrant leur intérêt sur la première catégorie. Les probabilités floues d'évolution sont ensuite converties en nombres entiers codés sur un octet (défuzzification) donnant des cartes de tendance d'évolution. Les cartes extrapolées sont obtenues par seuillage des degrés d'appartenance selon les coefficients d'évolution globale calculés par la méthode de régression linéaire.
Extrapolée à l'année 1994 les auteurs obtiennent un écart en surface boisée inférieur à deux pour cent (fig. 80).

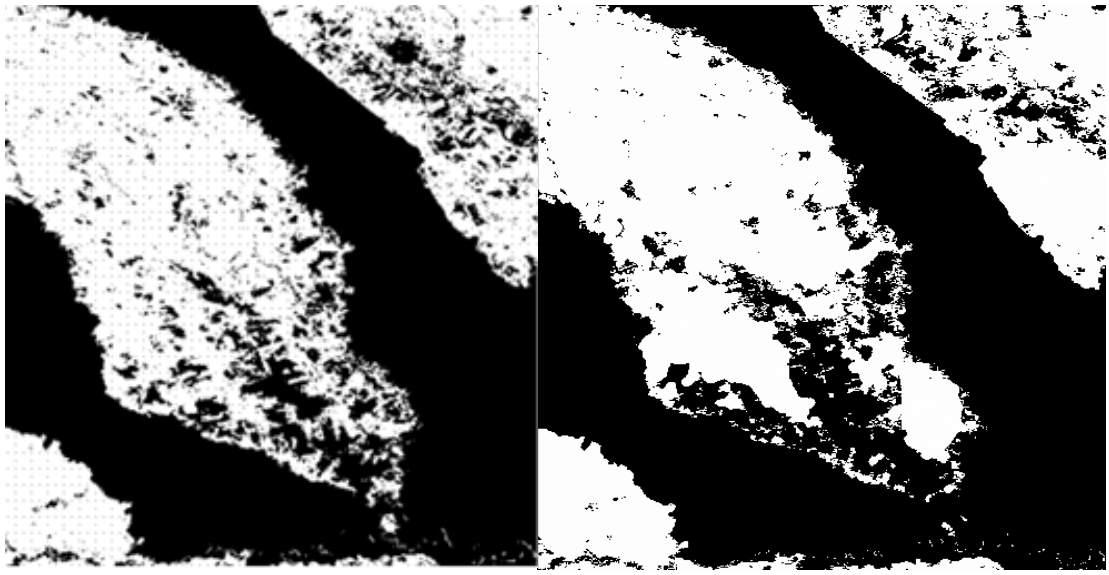


Fig. 80 : Surfaces déboisées (en blanc) observées (à gauche) et prédites (à droite) en 1994, réserve forestière de Ticoporo (Andes vénézuéliennes). *Source : Selleron et Mezzadri-Centeno, 2002*

La publication ne fournit pas d'informations sur la correspondance pixel par pixel, autrement dit : quel est le degré de concordance spatiale des scores prédits ? La validation prédictive ne se base que sur la somme cumulée indépendamment de la réalisation spatiale de l'événement. Afin d'améliorer le modèle, les auteurs envisagent d'y inclure davantage de facteurs exogènes qu'ils se proposent de formaliser en tant que règles de comportement.

A travers les exemples exposés et la littérature consultée, on perçoit l'intérêt d'une approche combinée, voire d'un véritable couplage de modèles, étant donné les restrictions propres à chaque approche selon les hypothèses de départ. C'est cette direction que nous avons effectivement suivie depuis la fin des années 1990.

Chapitre 2. Un modèle géomatique combiné de simulation prospective de l'occupation du sol

Comme on l'a déjà indiqué (cf. partie I, chapitre 3, § 4), nos recherches précédentes sur la dynamique des milieux et des paysages (à travers l'occupation du sol) nous ont naturellement conduit à appliquer aux mêmes terrains nos recherches en modélisation prospective. Concrètement, rappelons-le, il s'agit, en France, du bassin versant des Garrotxes, situé au centre du massif du Madrès-Coronat (Pyrénées Orientales), et, en Espagne, de la Alta Alpujarra Granadina qui englobe toute la partie occidentale du versant méridional de la Sierra Nevada (Andalousie).

Le phénomène modélisé, l'occupation du sol, appelle un rapide commentaire. Nous entendons ce terme dans le sens de Burel et Baudry (1999) qui, s'appuyant sur Turner et Meyer (1994), définissent ainsi l'occupation du sol, en la distinguant de l'utilisation des terres : « L'occupation du sol (*land cover*) décrit l'état physique des terres, de la surface du sol (type de végétation, présence d'eau, de roches…). Un changement d'occupation du sol peut consister en une conversion (passage de la forêt à la culture) ou une modification (densité d'arbres d'une forêt). L'utilisation des terres (*land use*) décrit la façon dont les hommes utilisent la terre, les usages, les pratiques ; c'est le type d'agriculture, de pâturage, d'habitat… Un changement d'utilisation de la terre en un endroit peut consister en un changement d'usage ou une modification de l'intensité d'usage (augmentation de la pression de pâturage, suppression de la fertilisation organique ou minérale). » On note une convergence avec la conception de paysage de Michelin (1995) mentionnée ci-dessus.

Nous considérons l'occupation du sol comme un indicateur pertinent, disponible à haute résolution, d'une combinaison d'activités humaines que les sociétés déploient dans l'espace – et auxquelles l'occupation du sol réagit avec une certaine inertie – et de facteurs naturels. Sa valeur d'indicateur est reconnue et mise en avant dans les travaux du programme LUCC (LUCC, 2004).

Objet privilégié (pou nous) de l'analyse spatiale et reflet des mutations spatiales qui se sont succédées dans le temps, l'occupation du sol est un système complexe, ouvert et dynamique, révélateur de l'action de l'homme sur son milieu. En tant qu'indicateur des relations qu'entretiennent les sociétés avec le milieu, l'occupation du sol occupe une place privilégiée. Elle est directement visible dans le paysage et – de ce fait – mémorisée depuis longtemps sous forme cartographique. Elle est également détectable à distance : photographies analogiques verticales et images numériques satellitales l'enregistrent depuis la naissance de ces techniques. Autrement dit : la donnée est disponible avec une profondeur historique remarquable et sa valeur explicative reconnue en de nombreux domaines.

2.1. Description du modèle

Positionnement méthodologique

Le modèle que nous présentons se veut être simple à deux égards : simple dans le lever des données d'entrée et simple dans sa mise en œuvre informatique. En ce qui concerne le premier aspect, nous nous limitons à quelques données facilement disponibles : l'occupation

du sol elle-même ainsi qu'un nombre limité de critères potentiellement explicatifs quant à la répartition de l'occupation du sol dans l'espace et ses mutations dans le temps. Concrètement le nombre de ces variables d'environnement utilisé dans les mises en œuvre réalisées à ce jour ne dépasse jamais la dizaine. Il s'agit de données telles que l'altitude, l'accessibilité, la pente, la proximité spatiale aux pixels ayant le même état ou encore les modes de gestion de l'espace. Ces données sont évaluées quant à leur significativité pour expliquer la répartition de l'occupation du sol au cours d'une phase d'apprentissage. Ces connaissances doivent être acquises par le modélisateur et se matérialisent sous forme de cartes de probabilités d'état à l'instant t_0 ou durant la période t_{0-n} à t_0 qui est généralement une période du passé proche.
La seconde exigence est satisfaite par l'emploi d'algorithmes implémentés dans un logiciel SIG commercialisé que nous employons. Il faut dire que l'introduction d'outils d'aide à la décision et de modélisation spatio-temporelle dans les logiciels SIG est à la fois récente (cf. partie I, chapitre 1) et encore restreinte à un certain nombre d'entre eux. Cependant leur disponibilité répond aux critiques que nombre d'utilisateurs expriment et témoigne d'une évolution des SIG. En effet, ceux-ci étaient longtemps des simples logiciels de représentation cartographique avec comme seuls outils d'analyse les requêtes attributaires (algèbre relationnelle) et le croisement des plans d'information (algèbre booléenne). Ainsi Macmillan (1997) déplore que les résultats de modélisation par SIG sont peu féconds ; un constat qu'il explique en partie par « la relative pénurie d'outils de modélisation dans les progiciels commerciaux des SIG ». Pour reprendre une expression de Ruas (1999), il est à espérer que le SIG deviendra un SAG (système d'analyse géographique).

Le modèle proposé est conçu pour la simulation de l'occupation du sol à grande échelle. Les champs d'application et les conditions de généralisation sont en cours d'évaluation. Les tests entrepris se limitent au domaine montagnard méditerranéen.

Selon la typologie des modèles de Sauvant (2003), notre modèle est empirique, aléatoire et dynamique. Il se range dans la catégorie des simulations à temps discret (Coquillard et Hill, 1997).

Les approches modélisatrices mobilisées

Le modèle combine les approches suivantes : chaînes de Markov, automate cellulaire, logique floue et l'évaluation multicritère et multiobjectif. Plus concrètement le modèle :

- Utilise les tests statistiques classiques pour évaluer la significativité des variables d'environnement pour expliquer la variable modélisée : l'occupation du sol.
- Fait appel à la logique floue au niveau de l'ajustement des données nécessaire dans la phase d'évaluation multicritère.
- Est stochastique pour l'aspect prédictif de la simulation à événements discrets et états finis - chaînes de Markov avec mémoire.
- Remédie aux limites de l'analyse markovienne (non prise en compte de l'espace) par recours à une méthode d'évaluation multicritère qui optimise l'implantation spatiale des probabilités de transition de la variable modélisée par l'emploi d'une base de connaissances et de règles d'inférence relatifs à la phase d'apprentissage (calibration) du modèle.
- Se sert d'un automate cellulaire qui par analyse de voisinage favorise l'apparition de zones de probabilités d'états ayant une extension surfacique réaliste sans pour autant forcer l'état de pixels isolés ayant une probabilité de transition très importante.

Les tests statistiques pour le choix des variables d'environnement sont la régression linéaire, la régression logistique, l'analyse en composantes principales (ACP). La significativité des résultats est exprimé avec un intervalle de confiance de 99 et de 99.9 %
L'ajustement des données pour les variables d'environnement se fait par diverses fonctions d'appartenance utilisant le concept de logique floue (cf. Saaty, 1977 ; Eastman et Jiang, 1996). Ces fonctions transforment les états des variables du type *facteur* en degré de probabilité pour l'évaluation multicritère (cf. ci-dessous). L'approche floue est d'autant plus indiquée que la conception de l'espace, en perpétuelle mutation, en tant que continuum, ne présente que rarement des limites fixes (cf. Gadal et Jeansoulin, 2000).
Les chaînes de Markov utilisées se basent sur l'emploi de deux images de la variable modélisée ($t_{0\text{-}n}$; t_0) et produisent en sortie deux matrices de transition : l'une des probabilités, l'autre des surfaces de transition. A cela s'ajoute une image des probabilités de transition conditionnelle pour chaque état de la variable modélisée et ceci à chaque instant (itération). Selon la typologie de Coquillard et Hill (1997), nous ne pouvons les classer dans la catégorie des modèles sans mémoire.
L'automate cellulaire est très simple. Il a comme propriétés structurelles une matrice carrée à deux dimensions non torique à voisinage étendu. Il se base sur une liste d'états discrets et finis. Les règles de transition sont fixées par un filtre de contiguïté. La simulation du parallélisme est synchrone. Le fait que les connaissances sont injectées et que l'automate n'est pas adaptatif dans le sens de Langlois et Philipps (1997) ne permet pas de le considérer comme appartenant au domaine de l'intelligence artificielle distribuée.
Pour répondre à la seconde critique formulée par Coquillard et Hill (1997) quant au modèle markovien – leur indépendance vis-à-vis de l'espace, notre modèle prévoit la spatialisation des probabilités de transition par recours à l'évaluation multicritère (EMC). Celle-ci s'appuie sur une base de connaissances stochastique et des règles d'inférence.

L'EMC est classée parmi les techniques d'aide à la décision – un concept que nous allons introduire brièvement avant de présenter l'approche EMC choisie.

« L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part. » (Roy, 1985). L'essor des méthodes multicritères est lié, entre autres, à la critique de la voie unique postulant qu'il existe une seule et unique solution optimale. La critique de ce postulat d'optimum est à la base des travaux de Schärlig (1990).
Une approche très formalisée de l'évaluation multicritère est proposée par Maystre et al. (1994) : la méthode ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant le REalité) mise en œuvre pour des applications d'implantation, de desserte, d'organisation et d'exploitation ou encore pour optimiser des chaînes de traitement. Dubus et al. (1997) proposent une application environnementale des techniques d'aide à la décision pour la gestion des déchets ménagers.

L'approche que nous avons choisie fait partie des techniques d'aide à la décision se basant sur l'hypothèse que plusieurs critères influencent l'objectif à atteindre. Nous utilisons le terme aide à la décision par évaluation multicritère (EMC) dans le sens de Yager (1988), Diamont et Wright (1989), Carver (1991) et Eastman (1996, 2003) se référant aux travaux précurseurs de

Alonso (1968). Certaines caractéristiques de cette approche comme les connaissances injectées et les règles d'inférence laissent entrevoir une similitude méthodologique avec les systèmes experts.
L'EMC est une technique d'aide à la décision basée sur plusieurs critères et un seul objectif. En l'occurrence l'objectif est l'occupation du sol. Celle-ci est une variables à états discrets et finis : les différentes catégories d'occupation du sol. Ces états sont concurrents. Dans un premier temps on applique l'EMC pour chaque état. Par la suite ces états sont mis en concurrence par la simulation markovienne et un algorithme d'évaluation multiobjectif (EMO). En peut considérer l'EMC comme un cas spécial de l'EMO.
Dans l'EMC les critères (variables d'environnement considérées potentiellement explicatifs de l'état de la variable modélisée) se scindent en deux catégories :

- Contrainte : un critère binaire. L'objectif – l'état de notre variable occupation du sol – est possible ou ne l'est pas. Rentrent dans la catégorie des contraintes toute décision booléenne du genre limite altitudinale, zonages PLU ou encore des exclusivités du type : forêt impossible sur bâti. L'effet d'une contrainte est qu'elle masque une portion de l'espace. Celle-ci est exclue du traitement ultérieur.
- Facteur : il indique un degré d'aptitude pour l'objectif ; un degré de probabilité que l'état se réalise. Contrairement à la logique booléenne classique (vrai, faux) ces critères se matérialisent sous formes d'images où chaque pixel exprime son degré de probabilité pour l'état considéré de la variable modélisée. Si cette dernière possède n états finis et discrets, nous aurons n images de probabilité pour le facteur considéré. Ces facteurs, en l'occurrence l'altitude, la pente, l'exposition, l'accessibilité, la proximité au même état, la probabilité de leur transition etc. sont exprimées dans des unités différentes (km, degrés, indices, …) qu'il convient d'ajuster selon diverses techniques : recodage manuel se basant sur des tests statistiques ou encore selon des fonctions d'appartenance par logique floue. Les facteurs ajustés sont ensuite pondérés selon leur degré d'influence sur l'objectif selon la technique de Saaty (1977). La dernière étape est la combinaison des facteurs pondérés. Cette combinaison est guidée par le choix d'un niveau de prise de risque et d'un niveau de compensation entre facteurs. Le niveau de prise de risque est approché par un continuum de logique floue (*andness*) dont les extrémiéts sont les opérateurs booléens classiques ET (intersection = minimum de risque) et OU (union = maximum de risque). Les possibilités de combinaison décrivent un espace de décision dans le sens de Eastman (1996, 2003 ; cf. fig. 81).

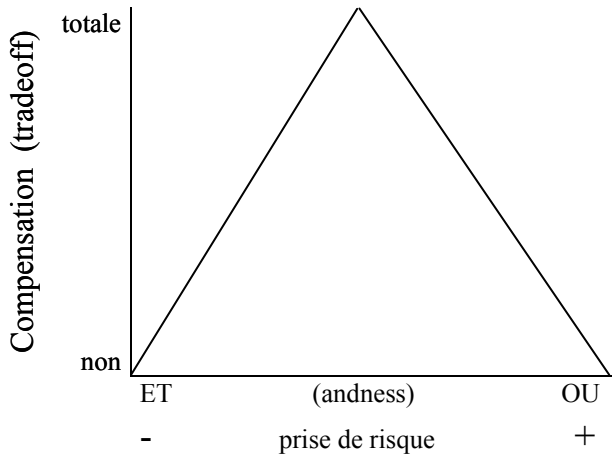


Fig. 81 : Espace de décision dans l'évaluation multicritère. *Source : selon Eastman, 2003*

L'évaluation multiobjectif (EMO) est prise en charge par le processus markovien auquel s'ajoute, pour l'implantation spatiale des probabilités de transition, une procédure de résolution entre objectifs concurrents (les états de la variable à simuler) basée sur les résultats de l'EMC. Intervenant à chaque itération de la simulation, l'algorithme produit une série d'images (une pour chaque état) qui codent la probabilité de l'état considéré par rapport aux probabilités de tous les autres états en tenant compte du domaine de réalisation prédit de l'état (matrice de transition markovienne). Ces images d'état, excluant tout chevauchement spatial, sont ensuite additionnées pour former une image de la prévision à l'instant n de la simulation.

L'agencement des différentes composantes décrit nous mène au modèle conceptuel suivant (fig. 82) :

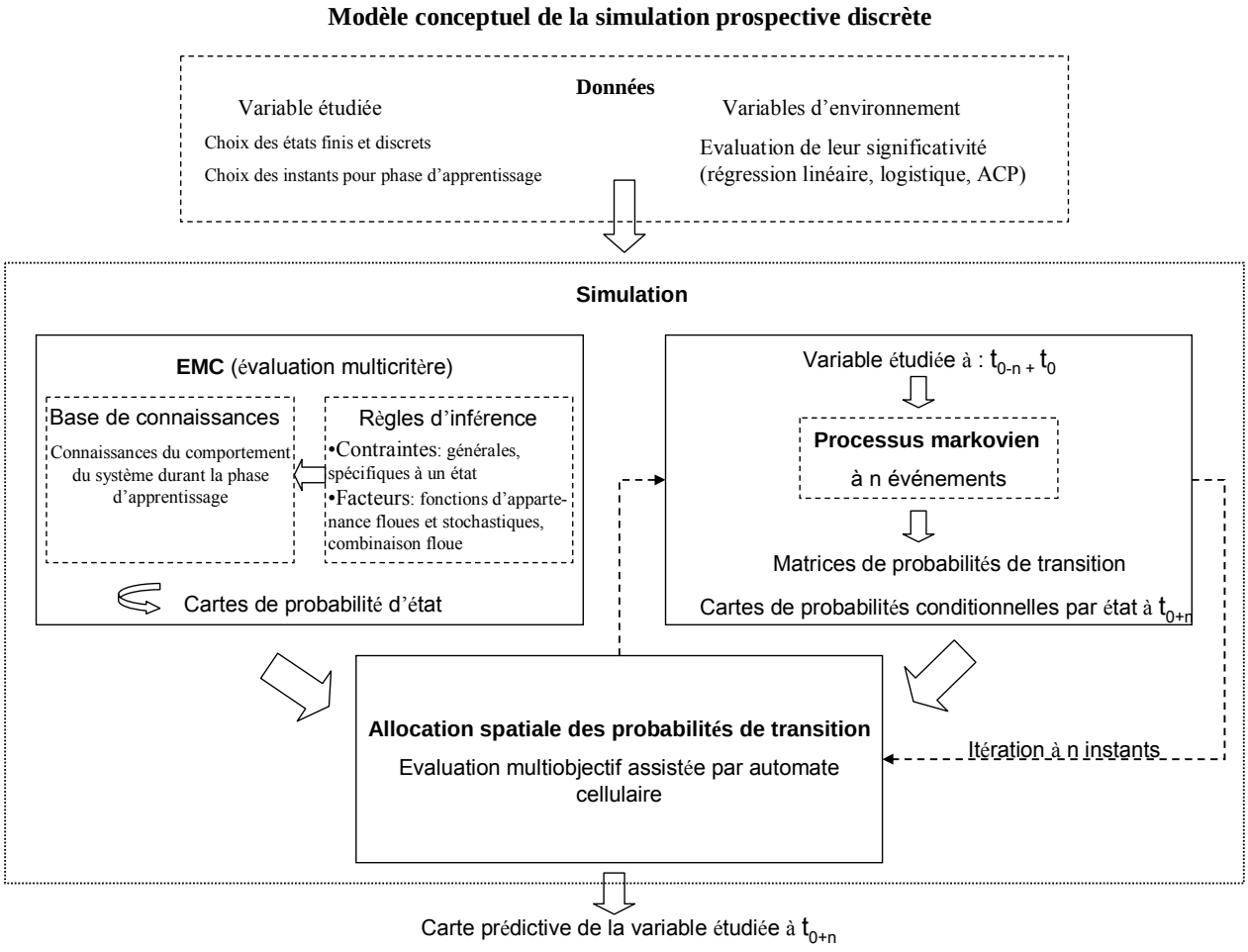


Fig. 82 : Modèle conceptuel de la simulation prospective discrète appliquée à la dynamique de l'occupation du sol

2.2. Mise en œuvre du modèle

La mise en œuvre du modèle, soutenue par le CNRS dans la cadre du Programme Environnement, Vie et Sociétés (PEVS) et par la le CICYT (Centro de Investigacíon Cientifica y Technológia) espagnol, se fait sous le logiciel SIG Idrisi version Kilimanjaro, édité par Clarklabs, Clark University, Worcester, Massachusetts, Etats-Unis. Nous puisons dans ce logiciel notamment deux macrofonctions :

- L'interface d'aide à la décision (Decision Wizard) qui fait appel aux fonctions suivantes : MCE (évaluation multicritère), MOLA (évaluation multiobjectif), Fuzzy (fonctions d'appartenance par logique floue), WEIGHT (pondération des facteurs par la technique de Saaty, 1977) et RANK (algorithme basique de tri par ordre ascendant ou descendant).
- CA_MARKOV : couplage des fonctions MARKOV (chaînes de Markov), CA (automate cellulaire), de MCE et de MOLA.

Spécifications techniques du modèle

Chaînes de Markov

L'algorithme se base sur l'état de la variable modélisée aux instants d'apprentissage t_{0-n} et à t_0 et calcule les sorties suivantes :

- Matrice de probabilités de transition
- Matrice de surfaces de transition
- Ensemble d'images de probabilités conditionnelles (une image par état de la variable)

Remarque : les probabilités conditionnelles sont multipliées avec le résultat de la soustraction (1 – l'erreur proportionnelle) pour produire les probabilités conditionnelles finales. L'erreur proportionnelle exprime la probabilité que l'état de la variable dans les cartes d'entrée est faux. Une erreur proportionnelle égale à zéro exprimerait la confiance parfaite dans les événements de la phase d'apprentissage.
La matrice de probabilités de transition de sortie est le résultat de la matrice des deux images d'entrée ajustée par leur erreur proportionnelle. La matrice de surfaces de transition est obtenue par multiplication de chaque colonne de la matrice de probabilités de transition par le nombre de pixels correspondant dans l'image d'entrée à t_0.

Automate cellulaire

Les règles de transition sont décrites sous forme d'un filtre de contiguïté 5x5classique (fig. 83).

0	0	1	0	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1
0	1	1	1	0
0	0	1	0	0

Fig. 83 : Filtre de contiguïté à voisinage étendu (5x5) utilisé dans l'automate cellulaire

Les valeurs de sortie sont des nombres réels entre 0 et 1. On applique le filtre sur des images booléennes de chaque état (catégorie d'occupation du sol) prédit par l'analyse de Markov et dont les états sont intégrés par MOLA et ceci à chaque itération (instant des événements) de la simulation.
On obtient alors des images de probabilité pondérées qui sont multipliées avec les images d'aptitude produites par EMC et qui matérialisent la base de connaissances. Le résultat obtenu (image réelle) est converti en nombres entiers 0 – 255. L'effet est une pondération des probabilités des zones (agrégats de pixels contigus ayant le même état) petites. En résumé, l'AC favorise des pixels dont l'état est à la fois probable et qui sont proches des pixels / zones ayant une probabilité élevé pour le même état.

Evaluation multicritère

Les variables d'environnement retenues sont scindées en contraintes et facteurs. Les contraintes peuvent s'appliquer à tous les états de la variable modélisée (occupation du sol) ou être spécifiques à certains états. Les contraintes agissent de manière booléenne sur la possibilité de la réalisation des états dans l'espace : vraie ou faux. Les pixels codés faux auront la probabilité d'état zéro.
Les facteurs : ils regroupent les variables d'environnement agissant de manière nuancée sur la probabilité de réalisation d'un état de la variable occupation du sol. Pour chaque facteur la probabilité par état varie entre 0 et 255 dans la matrice des pixels. Cette probabilité est évaluée, selon le type de la variable d'environnement, par deux procédures :

- Une fonction d'appartenance par logique floue. Plusieurs fonctions d'appartenance (linéaire, sigmoïde, …) sont proposées par le logiciel qui permet aussi la création de telles fonctions. Toutes sont paramétrables (cf. Eastman, 2003).
- L'écart significatif entre la distribution observée et la distribution théorique attendue. Pour cela on compare les états de la variable modélisée aux états (regroupés en classes afin de les rendre discrets et finis) de chaque variable d'environnement. L'écart est considéré significatif aux intervalles de confiance α 0.01 et 0.001 et se solde par la standardisation du facteur en degré d'aptitude pour l'état considéré selon l'échelle du tableau 2.

Intervalle de confiance α de l'écart entre distribution observée et distribution théorique	aptitude standardisée (0 – 255)
< -2 x α 0.001	0
< -1 x α 0.001	42
< -1 x α 0.01	85
non significatif	128
> 1 x α 0.01	171
> 1 x α 0.001	213
> 2 x α 0.001	255

Tab. 2 : Echelle de standardisation de l'aptitude d'un facteur d'environnement pour exprimer la probabilité d'état de la variable modélisée basée sur la significativité de l'écart entre distribution observée et distribution théorique

Les facteurs sont pondérés par une comparaison par paires, examinant l'importance relative d'un facteur par rapport à l'autre, selon Saaty (1977). Cette importance est calculée par la signification d'un facteur pour la variable modélisée selon l'évaluation des écarts entre distribution observée et théorique, mais aussi par des tests plus globaux (régression linéaire, logistique et ACP). La matrice de Saaty renvoie le vecteur propre de chaque facteur comme son poids. La matrice de pondération est validée par un test de consistance.
L'agrégation des facteurs d'environnement pour estimer la probabilité globale de chaque état de la variable modélisée est obtenue par la technique dite *ordered weighted averaging* (Eastman, 2003). Ce concept de poids d'ordre classe les aptitudes des facteurs d'environnement dans l'ordre ascendant et ceci pour chaque pixel de la carte. L'affectation des poids d'ordre, qui agissent alors de manière spécifique sur chaque pixel, permet de choisir le degré de compensation entre facteurs et le degré de prise de risque. La figure 84 illustre ce concept d'espace de décision à travers cinq exemples.

		Poids n° 1	Poids n° 2	Poids n° 3	Poids n° 4	Poids n° 5	Poids n° 6
1	Prise de risque moyenne, compensation totale	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
2	Prise de risque nulle, pas de compensation (approche booléenne de type ET)	1	0	0	0	0	0
3	Prise de risque maximale, pas de compensation (approche booléenne de type OU)	0	0	0	0	0	1
4	Prise de risque faible, peu de compensation	0.3	0.2	0.15	0.15	0.1	0.1
5	Prise de risque faible, compensation moyenne	0.28	0.22	0.20	0.15	0.10	0.05

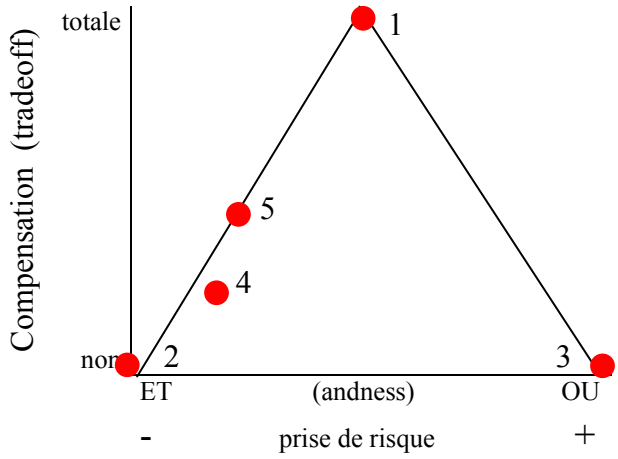


Fig. 84 : Espace de décision illustrant l'effet des poids d'ordre dans l'EMC

Dans toutes les applications nous avons opté pour une prise de risque faible avec une compensation entre facteurs limitée (proche du cas n° 5 dans notre exemple). Le lecteur intéressé trouvera un approfondissement méthodologique dans Eastman (1996, 2003) et Paegelow (2001).

Evaluation multiobjectif (EMO)

Cette procédure de résolution de conflits entre objectifs concurrents se base sur les résultats de l'EMC. Intervenant à chaque itération (instant) de la simulation, l'algorithme produit une série d'images (une pour chaque état) qui codent la probabilité de l'état considéré par rapport aux probabilités de tous les autres états en tenant compte du domaine de réalisation prédit de l'état (matrice de transition markovienne). Ces images d'état excluant tout chevauchement spatial sont ensuite additionnées pour former une image de la prévision à l'instant n de la simulation.

Applications du modèle

Le lecteur trouvera une bibliographie ciblée sur les aspects méthodologiques et leurs applications sur le site de Clarklabs (Clarklabs, 2004) ainsi qu'à travers les publications des 17 centres régionaux de ressources d'Idrisi dans le monde (disponible à partir du site de Clarklabs). Les publications de ces derniers sont davantage orientées sur les procédures d'aide à la décision, notamment l'évaluation multicritère, que sur la simulation de dynamiques de systèmes spatiaux. Notons une publication récente de Ladet et al. (2004) de l'UMR DYNAFOR UMR 1201 INPT-ENSAT/INRA. Les auteurs utilisent la même approche appliquée à la dynamique de l'occupation du sol dans les Coteaux de Gascogne sans validation pour le moment.

Le modèle a été testé jusqu'à présent sur deux sites d'étude en suivant exactement la procédure décrite : le bassin versant des Garrotxes (Pyrénées Orientales, France) et la Alta Alpujarra Granadina (Sierra Nevada, Anadalousie, Espagne).
Une présentation de ces deux sites d'étude se trouve dans Paegelow et Camacho Olmedo (1997, 2003).

Application du modèle à la simulation prospective de l'occupation du sol en milieu montagnard – le cas des Garrotxes (Pyrénées Orientales, France)

La première application du modèle a été entreprise sur la dynamique de l'occupation du sol des Garrotxes.
« Les Garrotxes, situées dans le département des Pyrénées Orientales, à l'extrémité NO du Conflent forment un ensemble géographique constitué de cinq communes et d'une taille de 8 570 ha. Ce bassin versant présente une rive droite granitique, à modelé géomorphologique relativement lourd, où sont localisées la quasi-totalité des anciennes terrasses de cultures et des forêts de pins à crochet (Pinus uncinata) et de pins sylvestre (Pinus sylvestris) ; un espace à dynamique végétale très rapide. La rive gauche du Cabrils, cours d'eau collecteur ce jetant dans la Têt à Olette, est un large soulane orientée SO sur substrat schisteux avec un métamorphisme de contact dans les zones les plus basses et occupée par des landes majoritairement ligneuses (à base de Genista purgans et, dans une moindre mesure, de Calluna vulgaris), fortement embroussaillée aux altitudes les plus basses par des chênes verts (Quercus ilex). La particularité des Garrotxes est leur enclavement : le bassin versant, à l'écart des grandes routes, est délimité au nord par le massif du Madrès (2469 m), à l'ouest (Cami

Ramader) et au sud (Puig de la Tossa, Serrat del Cortal) par des chaînes culminant entre 1600 et 2000 m d'altitude et à l'est par la crête (Lloumet) de la soulane rejoignant le Madrès. La vallée du Cabrils présente une dégradation progressive du climat méditerranéen ; la remontée de l'influence méditerranéenne au cœur des Pyrénées Orientales étant assurée par la vallée de la Têt modifiant ainsi la rudesse du climat montagnard. » (Paegelow et al. 2004)
Le lecteur trouvera une étude approfondie des dynamiques de l'occupation du sol dans Paegelow (1995) et Métailié et Paegelow (2004).

Données

Ont largement contribué au lever des données de l'état de l'occupation du sol à différentes dates : Moles (1994), Beltrami (1996), Le Mouël (2001) et Doukhan (2003).

Au total, nous disposons de six cartes de l'occupation du sol : 1826 (cadastre napoléonien), 1942, 1962, 1980, 1989 (photographies aériennes) et 2000 (terrain et photographies aériennes).
Les cartes de l'occupation du sol sont géoréférencées dans la projection Lambert III et ont une résolution du pixel légèrement inférieur à 19 mètres. Dans le cadre de la modélisation nous n'utilisons que les trois dernières dates (1980 et 1989 comme cartes d'apprentissage) et 2000 pour la validation. Les cartes antérieures témoignent d'un comportement systémique jugé trop éloigné de l'actuel.
Etablies selon des sources différentes, ces cartes ont des légendes emboîtées. Pour la modélisation nous utilisons huit catégories d'occupation du sol : forêt de conifères, forêt de feuillus, broussailles, lande ligneuse (à base de Genista purgans), lande à dominante de graminées, prairies, cultures et bâti. Ne jouent un rôle actif dans la modélisation que les premières six catégories. Les cultures sont quasi-inexistantes en 2000 et le bâti est considéré sans évolution à cette échelle.

Les variables d'environnement sont des contraintes (certaines modalités des facteurs, l'exclusion du bâti et des régimes de gestion notamment d'ordre pastoral). A cela s'ajoutent six facteurs : l'altitude, la pente, l'exposition, l'accessibilité[13], la proximité au même état et l'indice de probabilité de transition basée sur la dynamique durant la phase d'apprentissage. Leur nombre restreint s'explique, d'une part, par la résolution spatiale élevée de notre approche rendant inopérant des sources à base communale et, d'autre part, par notre volonté de nous appuyer seulement sur un nombre limité de sources afin de faciliter la transposition du modèle sur d'autres sites.
La modélisation proprement dite est décrite dans Paegelow (2003b, 2003c). La fig. 85 résume le modèle implémenté sous Idrisi Kilimanjaro.

[13] Dans le sens de Dumolard (1999), cf. également fig. 20 (partie I)

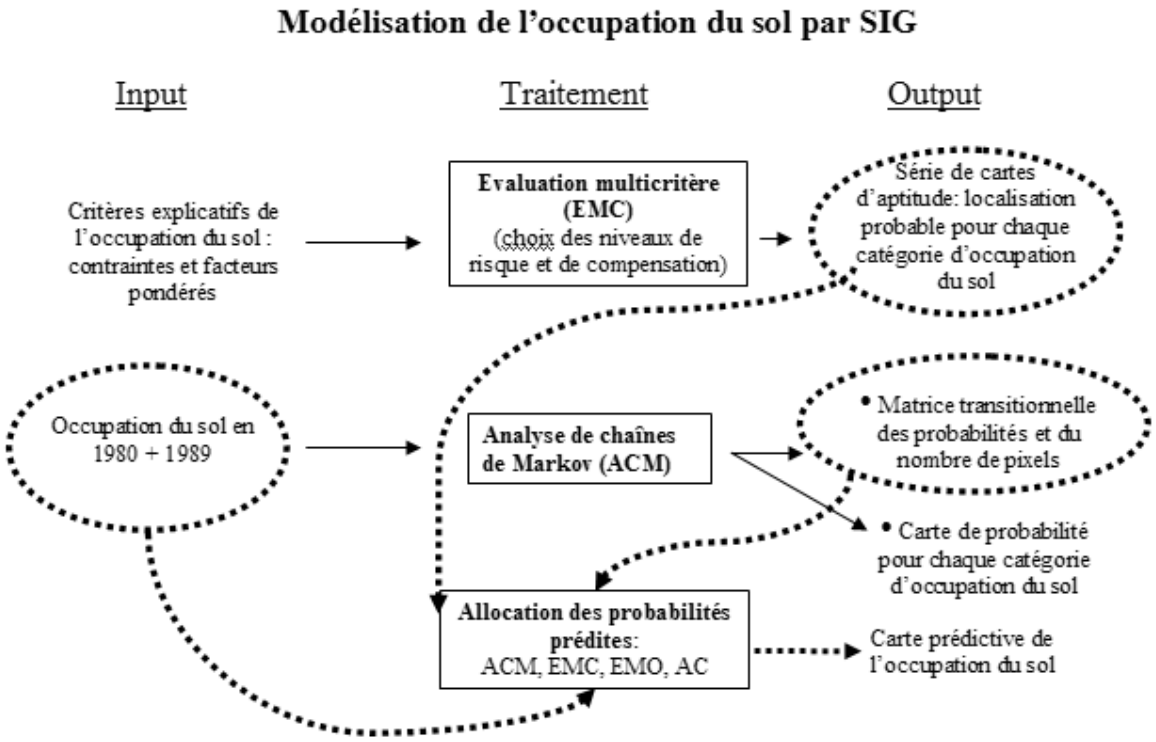


Fig. 85 : Mise en œuvre du modèle de simulation prospective de l'occupation du sol appliquée aux Garrotxes (66). *Source : Paegelow, 2004*

Application du modèle à la simulation prospective de l'occupation du sol en milieu montagnard – le cas de la Alta Alpujarra Granadina (Andalousie, Espagne)

« La Alta Alpujarra Granadina (34 484ha, partie occidentale du versant méridional de la Sierra Nevada) est un ensemble paysager et un petit pays de par son identité géographique et historique dont le gradient altitudinal (600 à 3480 m) compense, partiellement, le décalage latitudinal par rapport aux Pyrénées méditerranéennes. La limite méridionale de cet ensemble de 11 communes s'approche du Guadalfeo, un cours d'eau séparant la région d'étude de la Contraviesa ; la limite nord étant formée par la crête principale de la Sierra Névada avec les sommets les plus élevés de la péninsule ibérique : le Mulhacén (3479 m) et le Veleta (3396 m). En 40 ans le nombre d'habitants est passé de 4 200 à 1 200. La proximité aux grands centres urbains (Granada, Alméria, Malaga) expliquent un développement du tourisme rural important.
Le « plafond des possibilités vitales » (Bosque Maurel, 1969) fut atteint vers la fin du 19ème siècle. Depuis lors on assiste à une diminution progressive de l'agriculture, une tendance seulement inversée durant les années 1940-50 avec le défrichement de nouvelles terres difficile d'accès et d'une faible valeur agronomique. Mais dès le début des années 1960 l'exode rural généralisé dans les montagnes espagnoles a induit la réactivation du processus d'abandon successif des terres non irriguées puis des terres irriguées en altitude suivi de

l'abandon ou du semi-abandon des terres irriguées sur les versants plus bas. Cette transformation en friches, considérée par Pérez-Chacón Espino et Arnez Vadillo (1986) comme « manifestation écologique de l'abandon social », contribua à l'homogénéisation des paysages montagnards. Dans le contexte régional de la Sierra Nevada, la Alta Alpujarra est un exemple significatif de cet intense processus d'abandon. Actuellement son paysage agricole est dominé par un processus d'extensification et de naturalisation qui se matérialise par la place qu'occupent les terres abandonnées en tant que surfaces potentielles à végétation naturelle. » (Paegelow et Camacho Olmedo, 2003).

Cet espace ainsi que l'étude des principales dynamiques environnementales sont présentées dans les publications de Camacho Olmedo et al. (1996, 1997, 2002a, 2002b), de García Martinez (1999) et de Camacho Olmedo (2003). C'est en premier lieu Mayte Camacho Olmedo qui a constitué la base de données et mis en œuvre la simulation prospective appliquée à cet espace.

Données

La modélisation repose sur quatre cartes d'occupation du sol (1957, 1974, 1987, 2001) acquises par photo-interprétation et cartographie terrain et, pour 1974, par recours aux cartes thématiques. La résolution du pixel est de l'ordre de 20 mètres.
La légende des cartes d'occupation du sol est plus complexe, notamment en raison de la dynamique naturelle très lente. On distingue dix catégories : forêt de feuillus, forêt de conifères (reboisement), broussailles, pâturages, cultures non irriguées, cultures irriguées, mosaïque de cultures (non) irriguées, mosaïque de cultures (non) abandonnées, cultures abandonnées, zones urbaines et ravines.
Ont été utilisées pour la modélisation les cartes de 1957 et 1987 (phase d'apprentissage) et celle de 2001 pour la validation. La carte de 1974 a une légende très légèrement différente. Les sources utilisées n'ont pas permis de renseigner une catégorie présente aux autres dates.
Les variables d'environnement sont les mêmes que celles décrites à propos de l'application du modèle aux Garrotxes. A cela s'ajoutent des cartes de la végétation potentielle, de la géomorphologie et des sols.
La modélisation est décrite dans Paegelow et al. (2000, 2002, 2003, 2004).

2.3. Validation du modèle et interprétation des résultats

Les résultats finaux mais aussi ceux obtenus par application des différents sous-modèles sont exposés dans les publications listées ci-dessus. Nous résumerons dans ce cadre seulement l'état de la variable modélisée en fin de parcours de simulation et centrons son interprétation sur la validation du modèle.

Résultats - Garrotxes

Le tableau 3 résume les résultats. On y voit que les surfaces cumulées prédites pour chaque état de la variable modélisée sont très proches de la réalité observée. Cependant, elles ne nous donnent aucune information sur la ressemblance de la répartition spatiale des scores prédits avec la réalité. Cette comparaison pixel par pixel est l'objet du tableau 3 qui est le produit

cartésien des deux cartes. Le parcours en diagonale de la matrice indique une prédiction correcte pour les différentes catégories d'occupation du sol. Le taux de prédiction de l'occupation du sol pour 2000 est de 73% avec un maillage de l'espace inférieur à vingt mètres. Le tableau montre que la simulation engendre des résultats plus proches de la réalité pour des états couvrant des surfaces vastes et relativement stables (forêt de conifères, landes ligneuses) que pour des états ayant une extension réduite ou une dynamique rapide (broussailles). Enfin le taux de prédiction s'approche de zéro pour la catégorie cultures qui a quasiment disparu du paysage (0.007 % de la surface totale) et est de 100 % pour le bâti, figé dans la simulation. La fig.86 compare la cartographiquement la simulation à l'observation.

Garrotxes		Predicted land cover in 2000 % (area)								
		Forêts conifères	Forêts feuillus	Broussailles	Landes à genêts	Landes à graminées	Prairies	Cultures	Bâti	∑ observée
Real land cover 2000 %(area)	Forêt sconifères	35.81	0.12	3.47	0.63	0.43	0.47	0.00	0.00	40.93
	Forêts feuillus	1.19	6.45	2.92	0.58	0.32	0.23	0.00	0.00	11.69
	Broussailles	2.28	1.26	6.87	1.70	1.82	1.13	0.01	0.00	15.08
	Landes à genêts	0.32	0.40	1.68	18.00	1.12	0.09	0.00	0.00	21.61
	Landes à grami.	0.21	0.08	0.44	2.64	2.29	0.00	0.00	0.00	5.66
	Prairies	0.55	0.02	0.75	0.01	0.27	3.19	0.01	0.00	4.80
	Cultures	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.005	0.00	0.00	0.01
	Bâti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.230	0.23
∑ prédite		40.37	8.33	16.13	23.56	6.24	5.12	0.03	0.23	100.00

Tab. 3: Produit cartésien entre les états de la variable observée (lignes) et simulée (colonnes) pour 2000, Garrotxes. Données exprimées en pour cent de la surface totale.

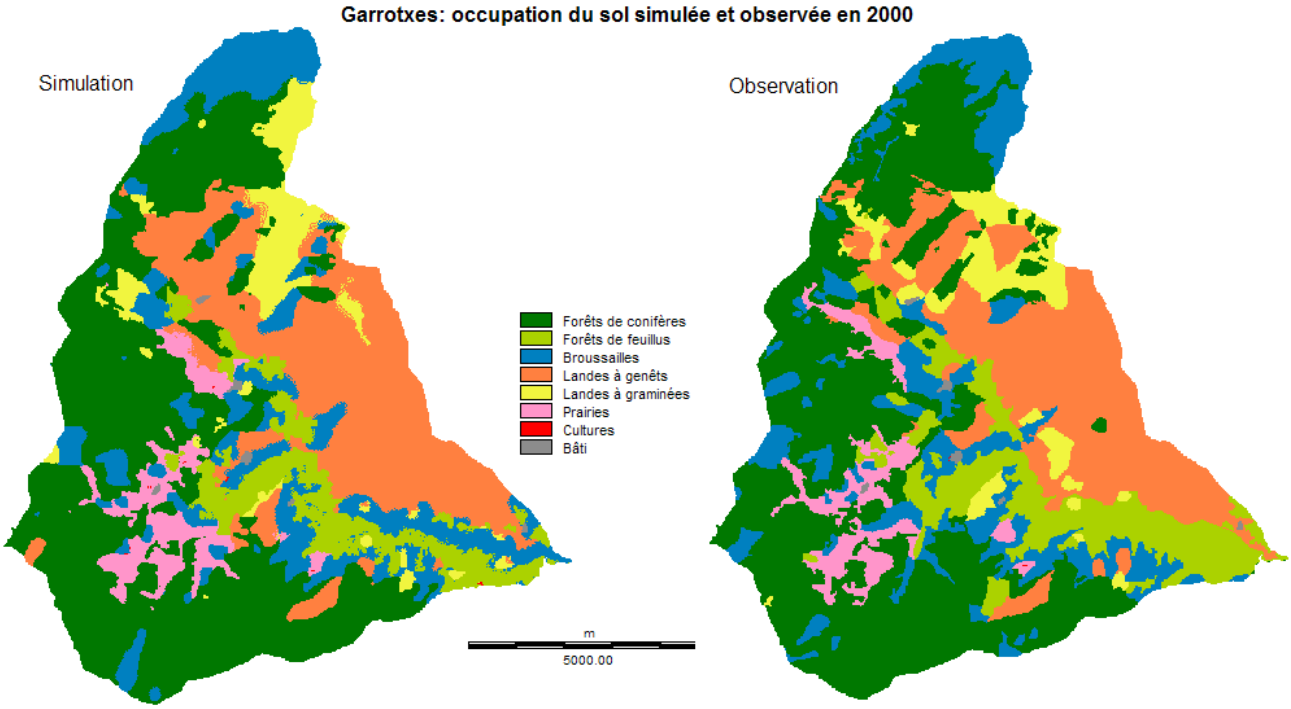


Fig. 86 : Garrotxes – occupation du sol en 2000 simulée et observée

Résultats – Alta Alpujarra Granadina (AAG)

Appliqué au site espagnol, le modèle aboutit à des résultats comparables (tab. 4). Les surfaces cumulées de chaque état de la variable sont également très proches de la réalité à l'exception de la catégorie reboisement de conifères. La répartition spatiale des états simulés est généralement proche de la réalité et ceci indépendamment de l'extension surfacique de ceux-ci. Seulement trois catégories (reboisement de conifères et confusion entre mosaïque de cultures abandonnées ou non et cultures irriguées) s'éloignent de la réalité. Le taux de prédiction global, avec un maillage de 25 mètres, est de 77.6 %.

Alta Alpujarra Granadina		Predicted land cover in 2001 % (area)										
		Deciduous forest	Scrubs	Pasture	Coniferous reforestation	Fallows	Mosaic cropland/ fallows	Irrigated cropland	Not irrigated cropland	Mosaic of (not) irrigated cropland	Urban use, badlands, mines	Sum of real land cover
Real land cover 2001 %(area)	Deciduous forest	9.31	0.04	0.00	1.27	0.10	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	10.86
	Scrubs	0.35	27.94	0.09	4.30	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.04	32.78
	Pasture	0.22	0.01	18.15	2.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.74
	Coniferous reforestation	0.01	0.16	0.00	9.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.22
	Fallows	0.11	1.49	0.14	1.49	8.33	0.35	0.69	0.00	0.03	0.00	12.63
	Mosaic cropland/ fallows	0.09	0.67	0.00	0.23	0.92	0.39	3.85	0.00	0.00	0.01	6.16
	Irrigated cropland	0.11	0.40	0.00	0.01	0.21	1.44	3.53	0.07	0.00	0.01	5.78
	Not irrigated cropland	0.01	0.05	0.00	0.00	0.36	0.10	0.00	0.53	0.00	0.00	1.05
	Mosaic of (not) irrigated cropland	0.01	0.00	0.00	0.03	0.14	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.25
	Urban use, badlands, mines	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.34	0.35
	Sum predicted land cover	10.21	30.76	18.38	18.74	10.22	2.28	8.31	0.61	0.06	0.40	100.00

Tab. 4 : Produit cartésien entre les états de la variable observée (lignes) et simulée (colonnes) pour 2000, Alta Alpujarra Granadina. Données exprimées en pour cent de la surface totale.

La fig. 87 est une cartographie comparant l'occupation du sol simulée à celle observée en 2001 sur le site espagnol.

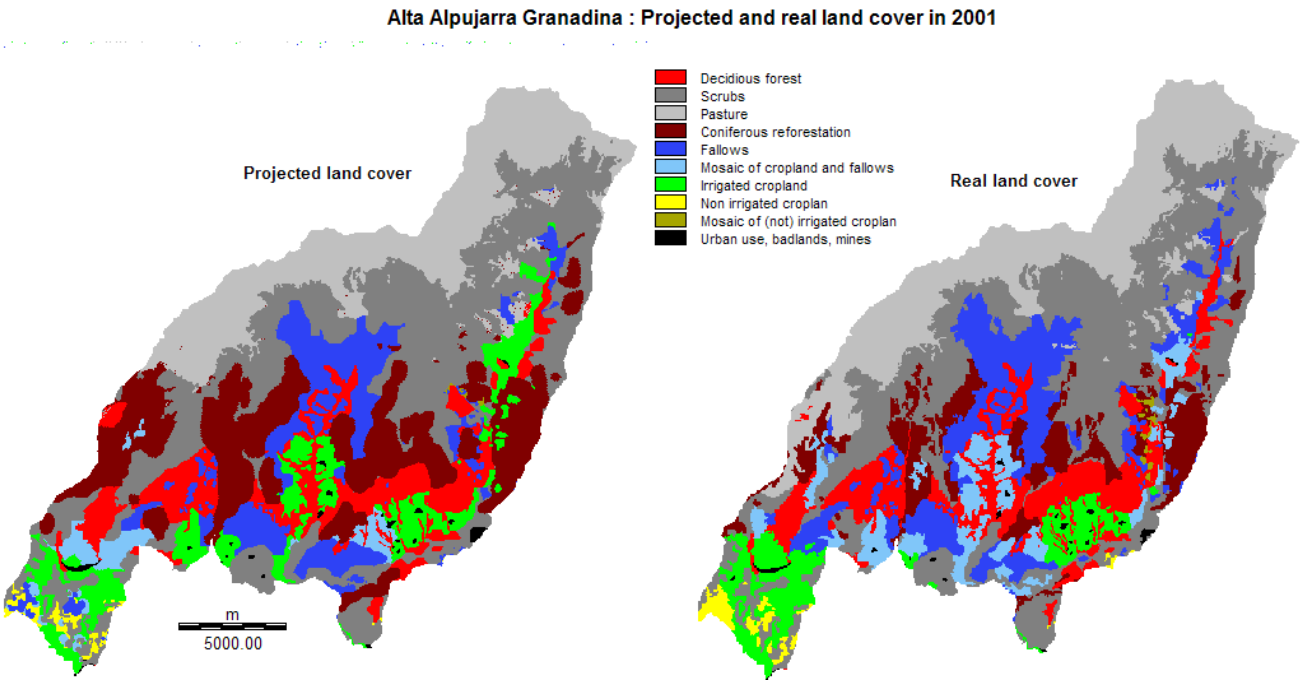


Fig. 87 : Alta Alpujarra Granadina – occupation du sol en 2001 simulée et observée

Interprétation

Les résultats, relativement proches, cachent des dynamiques assez différentes. Le taux annuel moyen de changement d'occupation du sol, exprimé sur la base de la surface totale, est de 0.3% en AAG, de 2.7% dans les Garrotxes. On enregistre sur le site espagnol, beaucoup plus stable que son homologue français, des résultats plus proches de la réalité. Cette stabilité spatio-temporelle accrue facilite déjà, en amont, l'évaluation multicritère. On obtient une base de connaissances exprimant mieux la répartition spatiale des différents états réalisés de la variable modélisée durant la phase d'apprentissage.
Les probabilités de transition issues de l'analyse de Markov se basent sur seulement deux instants. Là encore, la stabilité accrue de la partie occidentale du versant méridional de la Sierra Nevada facilite la simulations prospective. Par ailleurs, les probabilités de transition calculées sont, sur les deux sites, plus conformes à la réalité pour des catégories occupant de grandes surfaces et stables dans le temps. Tel est le cas des forêts de conifères et des landes à genêts dans les Garrotxes auxquelles on peut opposer les broussailles, qui, malgré la surface couverte importante, constituent une catégorie de transition dans les dynamiques de boisement et de déforestation. Leur réalisation spatiale, très fluctuante dans le temps, est plus difficile à simuler.
L'occupation du sol simulée à la date de validation reflète ces considérations. Ainsi, dans les Garrotxes, plus des trois quarts des forêts de conifères et de feuillus ainsi que des landes à genêts sont correctement prédits et ceci à vingt mètres près. Bien qu'occupant environ 15 % de la surface totale, moins de la moitié des broussailles sont correctement prédites quant à leur répartition spatiale. Ce taux s'élève à plus de 60 % pour les prairies, pourtant trois fois moins étendues mais plus stables dans le temps. Même constat sur le site espagnol où les formations les plus importantes en surface ont un comportement très stable. Plus de 85 % des forêts de feuillus, des broussailles et des pâturages sont correctement simulées. En revanche, la

simulation montre clairement ses limites pour deux cas de figure : les reboisements de conifères qui relèvent clairement d'un processus d'aménagement et qui sont difficilement simulables sans données explicatives externes. A elle seule cette catégorie totalise plus de 43 % des résidus (pixels incorrectement simulés). A cela s'ajoute l'enchevêtrement de micro-parcelles pour lesquelles l'échelle de l'étude, pourtant grande, n'est pas adaptée.
Pour les deux terrains, l'occupation du sol est décrite en catégories qualitatives. Cependant leur conception plus dynamique pour le site français permet de les ordonner en termes de dynamiques de formations végétales et selon leur aspect paysager. Les extrémités de cette échelle de rangs seraient alors les formations boisées formées et, à l'autre bout, les formations très ouvertes témoignant d'un usage plus intensif : les cultures. Même si le procédé est critiquable à plusieurs égards (concepts sous-jacents et distances paramétriques respectives entre les catégories), il nous autorise à mieux analyser les résidus de la simulation. Pour cela nous avons attribué aux sept catégories d'occupation du sol (hors bâti, stable par définition) les rangs 1 à 7 et ceci dans l'ordre de leur présentation sur les cartes de la fig. 86.
Ainsi pouvons-nous mesurer, pour les résidus, l'écart entre l'état observé et simulé (cf. fig. 88). Pour rester dans le schéma d'évolution paysagère évoquée, un écart positif signifierait une fermeture paysagère simulée mais pas intervenue tandis qu'un écart négatif indiquerait une ouverture paysagère faussement simulée.

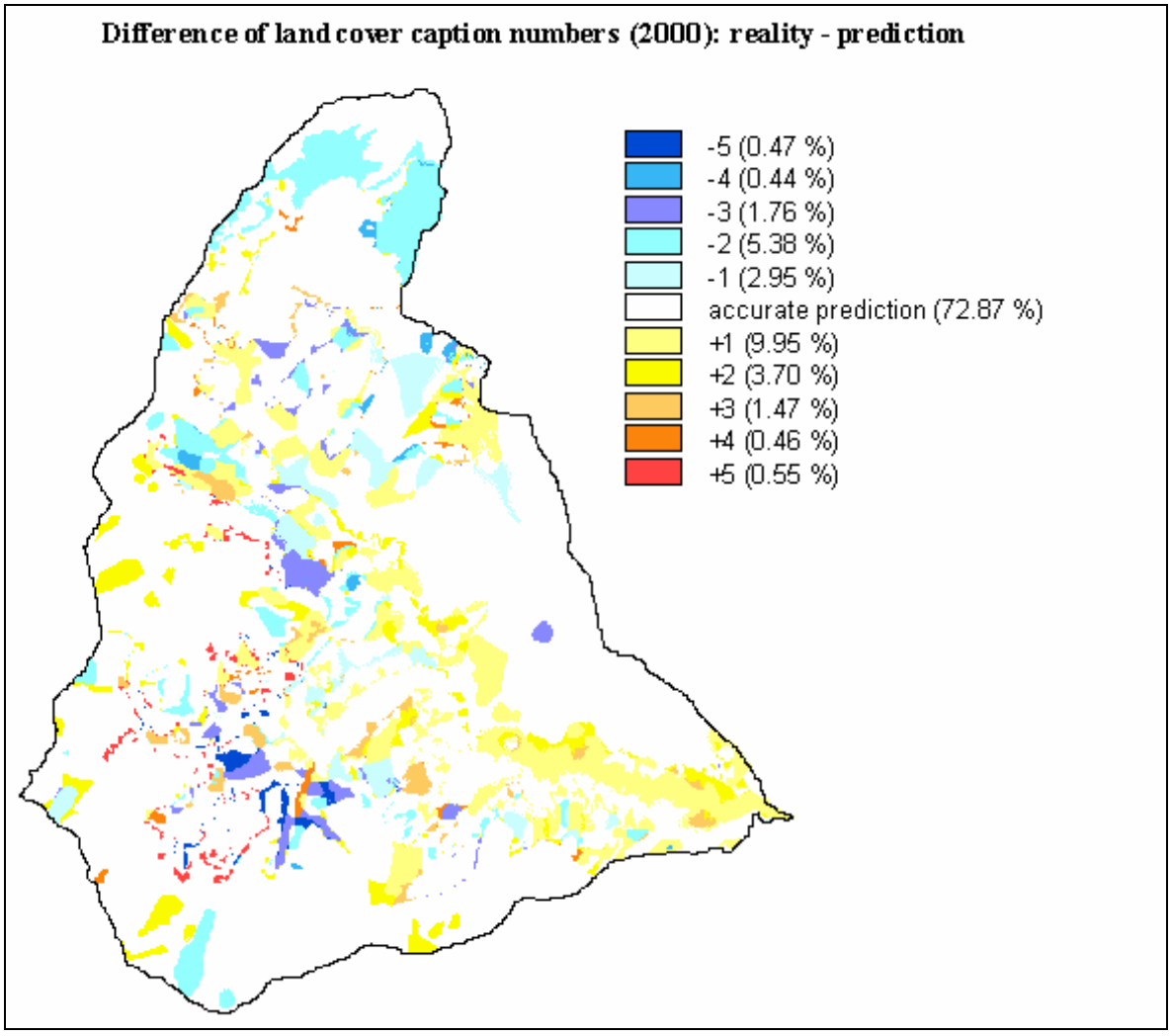


Fig. 88 : Ecart paramétrique entre états observés et simulés, Garrotxes (66). *Source : Paegelow, 2003*

Presque la moitié des pixels incorrectement simulés le sont avec un écart d'une seule catégorie. Moins de 19 % des pixels incorrectement prédits le sont avec un écart paramétrique supérieur à deux.

A ce stade – et avant d'aborder la validation du modèle par confrontation à d'autres modèles – les premières conclusions peuvent être tirées. Elles touchent à la fois la méthodologie et les données utilisées.

L'occupation du sol est représentée, dans les deux applications, sous forme d'un nombre restreint de catégories. La limitation de leur nombre s'explique par la qualité, parfois faible, des sources utilisées (anciennes missions aériennes notamment) et leurs procédures d'élaboration et objectifs différents. De cette logique du dénominateur commun découle une certaine variabilité interne aux catégories. Prenons un exemple : sur les deux cartes de la fig. 86 figure une zone relativement étendue, située le long de la vallée du Cabrils dans le sud-est de la carte simulée comme broussailles, mais observée comme forêt de feuillus en 2000. Durant la phase d'apprentissage, cette zone était classée à deux reprises comme broussailles dans la photo-interprétation. Pour le modèle la zone était stable durant le passé proche et il la prédit comme stable onze ans plus tard. En réalité la zone témoigne depuis une vingtaine d'années d'un processus de reboisement naturel : les broussailles devenaient plus denses et hautes et Quercus ilex s'imposait lentement. En 2000 la zone fut classée forêt de feuillus.
Cet exemple nous interroge – quant à la nature des données utilisées – doublement :

- Il renvoie à une discussion sur le niveau scalaire de la représentation de la variable à modéliser : n'est-il pas préférable de raisonner en termes de taux de couverture végétale, ne serait-ce en tant que donnée supplémentaire ?
- La relation entre le nombre de catégories censées représenter l'occupation du sol et le nombre d'instants observés : la variabilité de la catégorie broussailles est élevée sur la base de seulement deux dates d'apprentissage. Elle serait plus facilement à appréhender par une simulation s'appuyant sur une phase d'apprentissage plus fournie.

Sur le plan méthodologique les applications du modèle montrent clairement que :

- Les probabilités de transition de l'analyse de Markov déterminent à elles seules la surface cumulée des états simulés. Les autres composantes du modèle n'ont pour but que l'allocation spatiale des scores.
- Le modèle génère des résultats proches pour des sites dont la vitesse de dynamique paysagère est pourtant très différente (facteur neuf).
- Le modèle est paramétrable est rend possible des simulations sur des hypothèses de base différentes (scénarii).

Comme chaque modèle le nôtre est exposé à l'aléa ; en l'occurrence les feux de forêts et le chablis.

Finalement, il nous semble important d'insister sur la finalité des travaux exposés. Simulation ne veut pas dire prédictibilité. Elle nous ne prédit pas l'état futur, elle nous aide à mieux comprendre des processus environnementaux complexes dans l'espace et le temps. La simulation prospective de l'occupation du sol nous montre ce que la réalité pourrait être. C'est un scénario raisonné, scientifique dont la probabilité est quantifiée.

Chapitre 3. Le modèle du géographe face à celui du mathématicien

Nous avons apprécié la qualité du modèle proposé en comparant ses résultats à la réalité et ceci pour deux terrains d'études, appartenant certes au même domaine géographique, mais montrant des dynamiques d'occupation du sol assez différentes.
Une autre voie pour juger de la qualité d'un modèle et – le cas échéant l'améliorer – consiste à comparer ses performances à celles d'autres modèles. Pour cela, nous avons fait appel aux compétences du GRIMM (Groupement de Recherche en Informatique et Mathématique du Mirail), équipe d'accueil 3686 à l'Université Toulouse II désireux de trouver des applications concrètes à ses recherches. Un échange fructueux s'est instauré, débouchant sur les premiers résultats et laissant entrevoir des perspectives prometteuses. Ce véritable travail interdisciplinaire répond également à « l'insuffisante collaboration des mathématiciens et des informaticiens, notamment pour des recherches en intelligence artificielle … (Yves Guermond) », soulignée par Le Berre et Brocard (1997).
Concrètement, nos collègues du GRIMM proposent deux approches modélisatrices dynamiques (prise en compte de l'évolution), stochastiques et à temps discret (simulation discrète).

- Frédéric Ferraty[14] et Pascal Sarda[15] proposent un modèle paramétrique non linéaire
- Louis Ferré[3] et Nathalie Villaneix[16] proposent une approche par réseaux de neurones

L'intérêt de ces deux approches consiste aussi dans l'automatisation de certaines tâches comme l'élaboration de la base de connaissances pour la répartition spatiale des probabilités de transition. Dans notre modèle, ce processus peut être qualifié de *supervisé*. C'est le spécialiste qui, suite à une analyse de la dynamique de la variable modélisée durant la phase d'apprentissage et sa mise en relation avec des variables d'environnement, construit des cartes de probabilité d'état – en ce sens, l'évaluation multicritère est une technique d'aide à la décision. Les deux modèles alternatifs automatisent largement cette étape. Le modèle lui-même génère des connaissances quant à la répartition spatiale des états de la variable modélisée et son degré d'explication par les variables d'environnement. Dans cette quête, il s'agit d'optimiser le modèle (calibration). En revanche, les modèles alternatifs ne sont pas implémentés dans des logiciels SIG et nécessitent une phase de programmation importante.

[14] Maître de Conférences, habilité à diriger les recherches, au Département de Mathématiques et Informatique, Université Toulouse II
[15] Professeur au Département de Mathématiques et Informatique, Université Toulouse II
[16] PRAG, agrégée, au Département de Mathématiques et Informatique, Université Toulouse II,

3.1. Description des modèles alternatifs : modèle paramétrique non linéaire et réseaux neuronaux

Selon la typologie de Coquillard et Hill (1997), qui – comme la plupart des typologies – n'épouse pas parfaitement le cas de figure précis, les deux modèles sont stochastiques et dynamiques. Il s'agit de simulations purement discrètes. Le modèle par réseaux de neurones est qualifié d'intelligence artificielle.
La description de deux modèles ci-dessous s'appuie sur les contributions des quatre auteurs aux publications de Ferraty et al. (2004), Paegelow et al. (2004) et Villaneix et al. (2004).

Modèle paramétrique non linéaire

Le modèle paramétrique non linéaire peut être approché par le terme probabiliste dans le sens où la valeur simulé est le résultat d'une variable (aléatoire) suivant une certaine loi de probabilité (loi multinomiale) dépendant d'un certain nombre de paramètres. Plus exactement il s'agit de la loi conditionnelle, c'est-à-dire connaissant les valeurs du pixel et des pixels voisins dans le passé ainsi que des variables environnementales (indépendantes du temps). Le modèle est linéaire à une transformation près (modèle "logit").

Le modèle de régression logistique est un modèle linéaire généralisé (et donc paramétrique) dans lequel la variable réponse est qualitative et qui permet d'obtenir une prédiction de celle-ci en tenant compte d'un ensemble d'informations issues de variables explicatives. Lorsque la réponse possède plus de deux modalités, on parle de modèle de régression logistique multiple ou modèle de régression polychotomique (Hosmer et Lemeshow, 1989). D'autres développements plus récents concernant ce modèle ont été réalises par Kooperberg et al. 1997). Ce type de modèle logistique est particulièrement bien adapte à la problématique puisqu'il s'agit de prédire, pour chaque pixel, un type d'occupation du sol (variable modélisée à huit états). La spécificité de notre étude vient du fait que le modèle doit tenir compte, outre les variables d'environnement, d'un effet spatial (état de l'occupation du sol dans l'environnement du pixel) et d'un effet temporel (évolution de l'occupation du sol du pixel et de son environnement). En ce sens il s'agit d'adapter le modèle de régression logistique à notre cadre, un des enjeux les plus importants étant le choix de la forme et de la taille de l'environnement pris en compte par le modèle.
De façon générale, le modèle de régression logistique permet de modéliser, en fonction d'un certain nombre de paramètres, la probabilité pour que le type d'occupation du sol d'un pixel au temps *t* (c'est-à-dire la variable réponse) soit égal à une des huit catégories d'occupation du sol. Il s'agit donc d'estimer les paramètres inconnus du modèle, et ensuite les probabilités *a posteriori* de type d'occupation du sol sachant les valeurs des différentes variables explicatives. On utilise ensuite une règle de type *bayésien* consistant à affecter au temps *t* à un pixel donné l'indice de végétation ayant la plus forte probabilité *a posteriori*.

Régression logistique multiple spatio-temporelle

Indexons par $i = 1, 2, \ldots, N$ les pixels de la carte d'occupation du sol et notons T_i l'ensemble des informations dont on dispose concernant le pixel n° *i*. D'un point de vue formel, le modèle de régression logistique multiple que nous adoptons peut se présenter sous la forme générale suivante :

$$\log\left(\frac{Prob\,(pixel_i = v|\mathcal{I}_i)}{Prob\,(pixel_i = 8|\mathcal{I}_i)}\right) = \alpha_v + \gamma_{v,\mathcal{I}_i},\ i = 1,\ldots,N, \qquad (1)$$

où α_v est un paramètre associé au type d'occupation du sol v que l'on souhaite prédire pour le $i^{ème}$ pixel et γ_{vTi} un ensemble de paramètres lies à v ainsi qu'aux informations concernant toujours ce pixel n° i. Ainsi, le nombre total de paramètres mis en jeu dans ce modèle dépend uniquement du nombre de types d'occupation du sol et du nombre de variables explicatives. Dans l'expression (1) $Prob(pixel_i = v \mid T_i)$ représente la probabilité que l'occupation du sol du pixel i soit du type v lorsque les variables explicatives prennent les valeurs décrites par l'ensemble T_i. Notons que l'expression (1) modélise le rapport (son logarithme) de la probabilité qu'un pixel prenne la modalité v sur la probabilité que ce pixel prenne la modalité codée 8 ce qui permet d'intégrer la contrainte que la somme des huit probabilités est égale à 1.
Dans l'expression (1), nous devons intégrer l'*effet temporel* : celui-ci est pris en compte en faisant dépendre le type d'occupation du sol du pixel i du temps t c'est-à-dire en posant $pixel_i = pixel_i(t)$. Par ailleurs l'information (ou plus exactement une partie de cette information) dépend du temps $t-1$: $T_i = T_i(t-1)$. L'idée consiste donc à calculer la probabilité qu'un pixel prenne un type d'occupation du sol v à l'instant t en fonction de l'information que l'on possède sur ce même pixel à l'instant précédent $t-1$; on répète cette procédure pour tous les pixels de la carte. Connaissant les cartes à $t_{0\text{-}n}$ et t_0, on peut estimer l'ensemble des paramètres de notre modèle de sorte à ajuster au mieux la carte à t_0 (fin de la phase d'apprentissage). Il s'agit alors d'incrémenter le temps dans notre modèle pour prédire la carte à l'instant futur t_{0+n} à partir de la carte observée à l'instant t_0.
Quant à l'*effet spatial*, il est pris en compte de la même façon que dans l'approche par réseau de neurones. Il est en effet naturel de penser que l'évolution de l'occupation du sol du pixel i dépend de celle des pixels environnants. Pour cela on considère un voisinage carré V_i autour du pixel n° i que l'on souhaite prédire et on extrait comme information du voisinage V_i le nombre de pixels prenant le type n°1 d'occupation du sol, le type n°2 d'occupation du sol, ...
Cette façon de procéder revient à supposer une *invariance isotrope*, c'est-à-dire que le type d'occupation du sol autour du pixel i ne dépend pas de la direction. Dans la mise en oeuvre de la méthode, nous avons privilégié la simplicité de la forme du voisinage (carré). Lors de développements ultérieurs, on pourrait envisager d'autres formes que le carré (étoile, rectangle, ...) et varier s'il en résulte un gain ou pas en terme de prédiction. On peut également envisager une modélisation privilégiant certaines directions c'est-à-dire rompant avec l'hypothèse d'invariance isotrope. Notons cependant qu'il en résulterait un modèle avec un plus grand nombre de paramètres et que de ce point de vue on doit également composer avec la capacité à bien estimer un modèle qui serait trop complexe.
En combinant effet temporel et effet spatial, on est finalement amené à considérer le modèle suivant

$$\log\left(\frac{Prob\,(pixel_i(t) = v|\mathcal{I}_i(t-1))}{Prob\,(pixel_i(t) = 8|\mathcal{I}_i(t-1))}\right) = \alpha_v + \gamma_{v,\mathcal{I}_i(t-1)},$$

où $T_i(t-1)$ englobe l'information extraite du voisinage $V_i(t-1)$, c'est-à-dire tient compte de l'occupation du sol observée autour du pixel n° i à l'instant $t-1$.
Enfin, $T_i(t-1)$ comprend également l'information issue des variables telle que la pente ou l'altitude décrites plus haut.

Réseaux de neurones

L'utilisation des réseaux de neurones a été principalement motivée par leurs remarquables capacités d'adaptation et de souplesse face à un très grand nombre de problèmes, notamment lorsque ceux-ci présentent des aspects non linéaires ou lorsque les variables explicatives sont fortement corrélées – deux aspects présents dans le cas de la simulation de l'occupation du sol. Depuis quelques années, les réseaux de neurones concurrencent favorablement les méthodes statistiques classiques. On les retrouve notamment dans la prédiction de séries chronologiques (Bishop, 1995 ; Parlitz et Merkworth, 2000 ; Lai et Wong, 2001). Le cadre dans lequel nous sommes positionnés est encore plus étendu puisqu'il s'agit ici d'un processus spatio-temporel auquel s'ajoutent des variables explicatives, appelées aussi variables d'environnement.
Nous utilisons une classe particulière de réseaux de neurones, les réseaux multi-couches ou perceptrons (cf. chapitre 2, § 1). Ceux-ci ont été les premiers à connaître un essor important ; leur création est issue des premières tentatives de modélisation des principes de base régissant le fonctionnement du cerveau même si leur champ d'application s'est, depuis, considérablement élargi, notamment au traitement de données statistiques (cf. Davalo et Naim, 1969). Connues pour leurs remarquables propriétés d'approximation, nous avons choisi d'utiliser un réseau à une couche cachée dont l'architecture générale est celle de la figure 89.

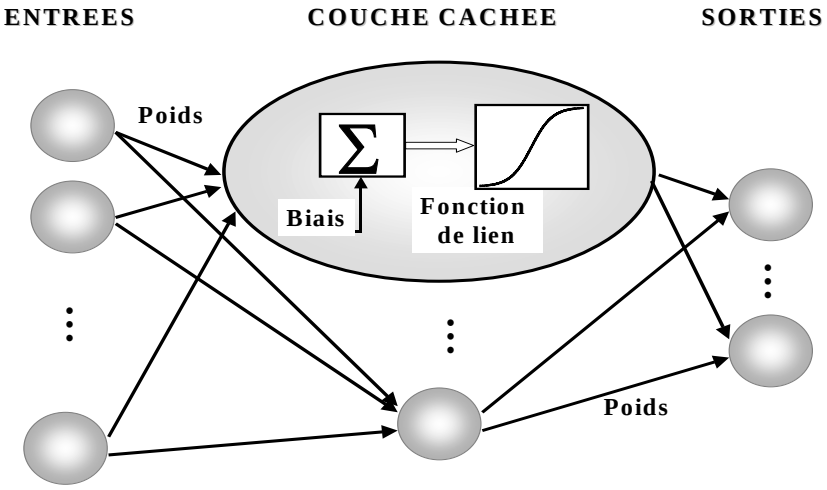


Fig. 89 : Architecture d'un réseau neuronal à une couche cachée. *Source : Paegelow et al., 2004*

Détaillons un peu le fonctionnement de ce réseau : en entrée, la valeur des neurones est celle des variables explicatives du modèle ; chacune de ces valeurs numériques est multipliée par un certain nombre de poids pour être, finalement, additionnée et transformée par une fonction de lien au niveau des neurones de la couche cachée. Enfin, les valeurs numériques des neurones de la couche cachée subissent à leur tour une multiplication par des poids et leur addition donne la valeur des neurones de sortie qui modélisent la variable expliquée. Les poids, généralement notés *w*, sont choisis lors d'une phase dite d'apprentissage sur un jeu de

données test et minimisent l'erreur quadratique de ce jeu de données. Finalement, les réseaux de neurones à une couche cachée sont les fonctions de la forme :

$$\psi_w(x) = \sum_{i=1}^{q_2} w_i^{(2)} g\left(x^T w_i^{(1)} + w_{i,0}^{(1)} \right)$$

où x est le vecteur des variables explicatives du modèle, q_2 le nombre de neurones sur la couche cachée, g la fonction de lien de la couche cachée (typiquement g est la sigmoïde $g : x \rightarrow \frac{1}{1+e^{-x}}$), $w^{(1)}$ sont les poids entre la couche d'entrée et la couche cachée et $w^{(2)}$ les poids entre la couche cachée et la couche de sortie.

L'intérêt de ce type de réseau est expliqué par le résultat suivant (Hornik, 1991 et 1993 ; Stinchcombe 1999): les réseaux de neurones à une couche cachée permettent d'approcher, avec la précision souhaitée, n'importe quelle fonction continue (ou d'autres fonctions qui ne sont pas nécessairement continues) : c'est ce que l'on appelle la capacité d'approximateur universel et c'est aussi ce qui leur permet de s'appliquer avec une grande efficacité à un grand nombre de modèles.

3.2. Mise en œuvre des modèles

Les deux modèles ont été mis en œuvre sur la base de données des Garrotxes. Les données sont identiques à celles utilisées dans la modélisation sous SIG à l'exception près que le nombre de variables d'environnement a été réduit à quatre : altitude, pente, exposition et accessibilité.

Modèle paramétrique non linéaire

La mise en œuvre du modèle repose, outre les références déjà citées, sur le travail de Cornez (2003). D'un point de vue pratique, la mise en oeuvre se décompose en deux étapes : une étape d'estimation et une étape de calibration.

Estimation
On estime les paramètres du modèle (α_v et ceux contenus dans $\gamma_{\mathbf{v}Ti(t-1)}$). La procédure d'estimation est basée sur la maximisation de la *vraisemblance pénalisée*, critère bien connu en statistique pour la stabilité des solutions obtenues. L'algorithme d'optimisation utilise est de type *Newton-Raphson*. Remarquons que la pénalisation introduit un nouveau paramètre, appelle paramètre de pénalisation et note ε, qu'il faudra choisir. Comme cela a été dit précédemment, on utilise les cartes de la phase d'apprentissage pour estimer les paramètres, ceci pour différentes tailles de voisinage et valeurs ε.

Calibration
Il s'agit de déterminer la taille de voisinage et le paramètre de pénalisation optimaux en ce sens que ces choix fourniront une prédiction de la répartition spatiale de la variable occupation du sol à t_{0+n} la plus proche possible de celle observée. En comparant les

différentes simulations – dont chacune est une combinaison spécifique de la taille de voisinage et de la valeur ε – à la réalité observée à t_{0+n}, on repère la carte qui possède le plus petit nombre de pixels mal prédits; la taille de voisinage et le paramètre de pénalisation correspondants seront considérés comme étant optimaux (pour les équations de régression polychotomique formulées, cf. Villaneix et al., 2004). Cette optimisation est atteinte avec un voisinage d'ordre 7 et un paramètre de pénalisation ε égal 10.

Réseaux de neurones

Deux spécifications ont été apportées au modèle quant à l'influence temporelle et spatiale sur l'état de la variable étudiée :

- Pour l'aspect temporel (processus d'ordre 1) : la valeur du pixel considéré à l'instant précédente est exprimée sous forme disjonctive. Par exemple, si l'on dispose de huit états d'occupation du sol, le premier sera codé sous la forme d'un vecteur à huit coordonnées : (1 0 0 0 0 0 0 0), le second : (0 1 0 0 0 0 0 0), etc.
- Pour l'aspect spatial : afin de calculer la fréquence de chaque type d'occupation du sol dans le voisinage du pixel considéré à l'instant précédent se pose alors le problème du choix du voisinage (taille et forme) : pour la forme, diverses possibilités s'offrent à nous, de la plus simple (voisinage carré ou en étoile) à des voisinages plus sophistiquées (voisinage suivant la pente pour mieux tenir compte des influences morphologiques du terrain). Quant à la taille du voisinage, il s'agira de déterminer jusqu'à quelle distance un pixel est susceptible d'influencer le pixel considéré. Afin de respecter la spatialisation de la carte, on pondèrera l'influence d'un pixel par une fonction décroissante de la distance au pixel considéré (cf. fig. 90).

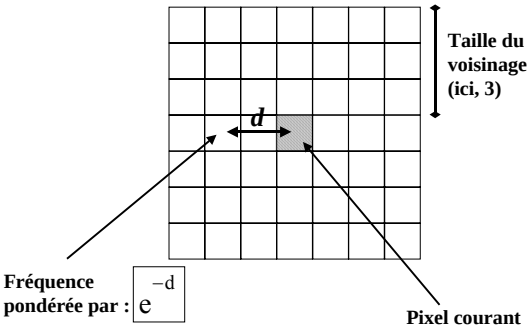


Fig. 90 : Exemple de voisinage. *Source : Paegelow et al., 2004*

A l'issu d'une phase exploratoire qui a permis de cerner les variables pertinentes et divers paramètres du modèle comme la forme du voisinage (que, dans un soucis de simplicité, nous avons choisi carré), sa taille (finalement fixée à trois, cf. fig. 90) ou le nombre de neurones optimal sur la couche cachée, l'architecture choisie compte, en entrée, 19 neurones :

- *Pour l'aspect temporel* : 7 neurones pour le codage disjonctif de la valeur du pixel (le bâti, constant, ayant été retiré de l'étude) à l'instant précédent.
- *Pour l'aspect spatial* : 8 neurones pour la fréquence des états de la variable étudié dans le voisinage (fréquence pondérée par une fonction décroissante de la distance) ;
- 4 neurones pour les variables d'environnement pente, altitude, exposition et distance aux infrastructures (préalablement centrées et réduites).
- Le réseau dispose aussi de 8 neurones sur la couche cachée et de 7 neurones en sortie, chacun estimant la probabilité d'appartenance du pixel à un type d'occupation du sol (hors bâti).

Le modèle était appliqué seulement sur des pixels frontières. Les pixels frontières sont des pixels dont au moins un pixel de leur voisinage a changé d'état durant la phase d'apprentissage.
D'un point de vue calculatoire, les programmes ont été réalisés à l'aide du logiciel Matlab (cf. Beal et Demuth, 1998) et sont disponibles sur demande.

3.3. Validations et interprétation des résultats

Modèle paramétrique non linéaire

Ce modèle, appliqué aux Garrotxes sur la base d'une phase d'apprentissage constituée des états de l'occupation du sol réalisés en 1980 et en 1989 et les variables d'environnement, pour simuler la répartition de l'occupation du sol en 2000 donne un taux de prédiction identique à celui obtenu avec le modèle SIG : 72.8 %. Comme toujours, ce taux de concordance avec la réalité observée tient compte de la répartition spatiale. Il s'agit d'une comparaison pixel par pixel dont la taille est d'environ 350 m². Les résultats du modèle paramétrique non linéaire épousent de manière différenciée la réalité. Ainsi la simulation des catégories d'occupation du sol relativement stables dans le temps est plus proche de la réalité que celle des catégories transitoires dans la dynamique de l'occupation du sol (cf. tab. 5).

Occupation du sol et fréquence	Forêt de conifères (40,9 %)	Forêt de feuillus (11,7 %)	Broussailles (15,1 %)	Landes à genêts (21,6 %)	Landes à graminées (5,7 %)	Prairies (4,8 %)
Pourcentage de mal prédits	11.9 %	51.7 %	57.1 %	14,4 %	59,2 %	25,6 %

Tab. 5 : Pourcentage de mal prédits (résidus) de la simulation de l'occupation du sol pour 2000, Garrotxes, par modèle paramétrique non linéaire

Le listing des états simulés pixel par pixel a été importé sous SIG pour l'exprimer sous forme de carte. La fig. 91 montre une comparaison du résultat de simulation par modèle paramétrique non linéaire avec la réalité observée (2000).

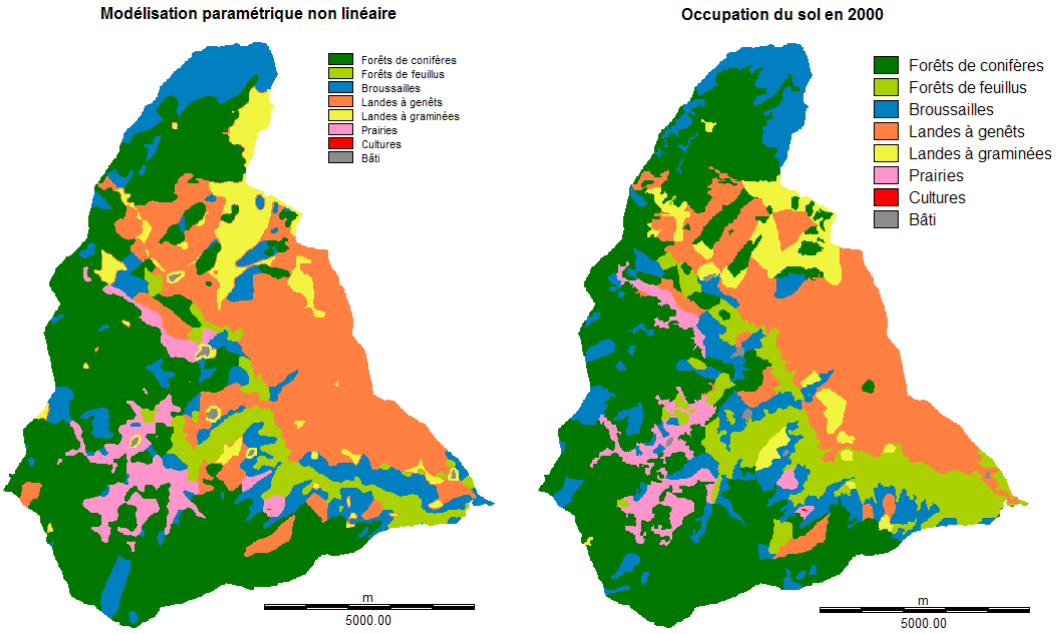


Fig. 91 : Occupation du sol en 2000, Garrotxes, simulée par modèle paramétrique non linéaire (à gauche) et observée (à droite)

Réseaux de neurones

Afin de confronter les résultats trouvés avec la réalité, la carte de 2000 a été reconstituée par le réseau de neurones après sa phase d'apprentissage, à partir des données de 1989. Le pourcentage de pixels incorrectement prédits est de 25,7 % (34,5 % si l'on s'en tient aux pixels frontières). On constate, cependant des différences suivant les types d'occupation du sol ; le tableau 6 donne le pourcentage de pixels incorrectement prédits par rapport aux pixels appartenant réellement à cette catégorie.

Occupation du sol et fréquence	Forêt de conifères (40,9 %)	Forêt de feuillus (11,7 %)	Broussailles (15,1 %)	Landes à genêts (21,6 %)	Landes à graminées (5,7 %)	Prairies (4,8 %)
Pourcentage de mal prédits	10,6 %	45,8 %	54,5 %	16,2 %	59,4 %	19,3 %

Tab. 6 : Pourcentage de mal prédits (résidus) de la simulation de l'occupation du sol pour 2000, Garrotxes, par réseaux de neurones

La simulation par réseaux de neurones donne globalement les meilleurs résultats. Cependant, ils appellent le même commentaire que ceux obtenus avec les deux autres modèles : la simulation épouse mieux la réalité pour les catégories d'occupation du sol relativement stables dans le temps et dans l'espace. Les résultats obtenus par le programme ont étaient

exportés de l'environnement Matlab au SIG. La fig. 92 montre une comparaison du résultat de simulation par réseaux neuronaux avec la réalité observée (2000).

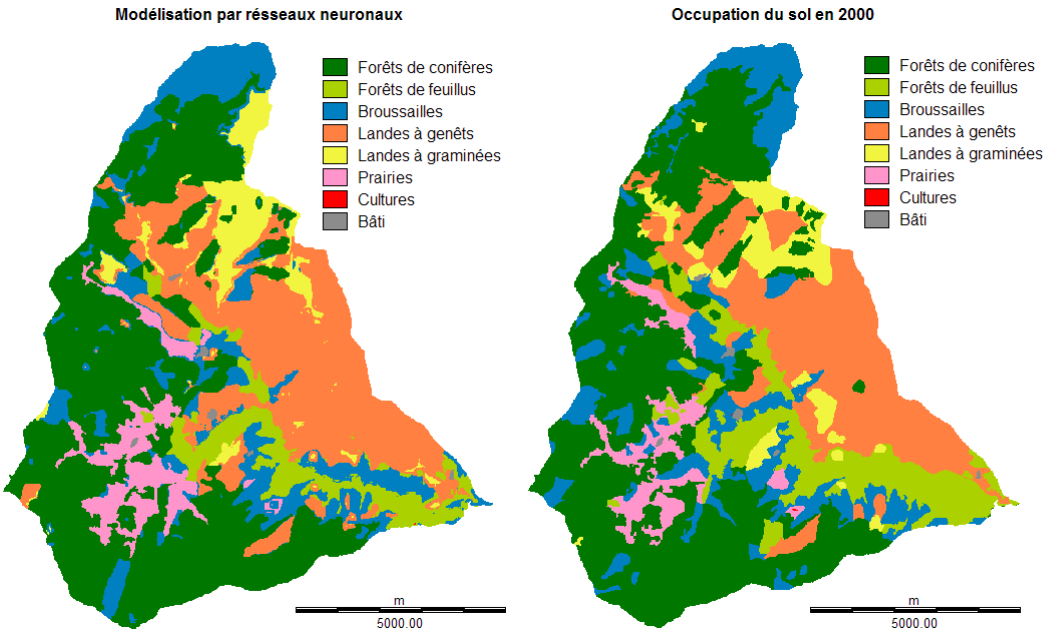


Fig. 92 : Occupation du sol en 2000, Garrotxes, simulée par réseaux neuronaux (à gauche) et observée (à droite)

Ces résultats sont d'autant plus encourageants que certains auteurs déplorent les limites inhérentes à une modélisation largement automatisée (cf. Gadal, 1998).

Chapitre 4. Le croisement des regards

L'objectif de ce chapitre est une interprétation croisée des résultats générés par les trois modèles. Sur ces bases nous menons une réflexion intégrée afin de déboucher sur des perspectives d'amélioration du modèle SIG ainsi que sur la possibilité de proposer un modèle couplant les trois méthodologies.

Pour résumer le positionnement méthodologique des trois modèles, nous pouvons simplifier en disant que nous comparant un modèle implémenté sous SIG couplant logique floue, évaluation multicritère, chaînes de Markov et automate cellulaire dans une approche supervisée quant à l'élaboration des connaissances agissant sur la répartition spatiale des probabilités de transition à deux modèles purement statistiques. Ces derniers sont également stochastiques et permettent des simulations à temps discret mais élaborent de manière automatique les connaissances guidant l'allocation spatiale des probabilités de transitions prédites.

Les premières comparaisons des résultats des trois modèles ont été effectuées : comparaison entre modèle SIG et modèle par réseaux neuronaux (Paegelow et Villaneix, 2003) et comparaison entre les trois approches (Paegelow et al., 2004 ; Villaneix et al., 2004).

Les trois approches ont été testées par la modélisation de l'occupation du sol à la dernière date connue (2000) sur le site des Garrotxes.
Le tableau 7 indique les surfaces cumulées de chaque catégorie d'occupation du sol observée et simulée par chacun des trois modèles.

Occupation du sol en 2000	Réalité	Modélisation		
		SIG	Réseaux neuronaux	Modèle paramétrique
Forêt de conifères	40.9	40.7	41.4	41.2
Forêt de feuillus	11.7	6.0	7.2	6.3
Broussailles	15.1	16.9	14.1	14.6
Landes à genêt	21.6	23.3	25.1	25.9
Landes à graminées	5.7	7.6	6.0	6.2
Prairies	4.8	5.2	6.0	5.7
Cultures	0	0	0	0

Tab. 7: Surfaces (%) cumulées de chaque catégorie d'occupation du sol observées et simulées (chiffres arrondis)

La fig. 93 présente le résultat des simulations et la réalité observée.

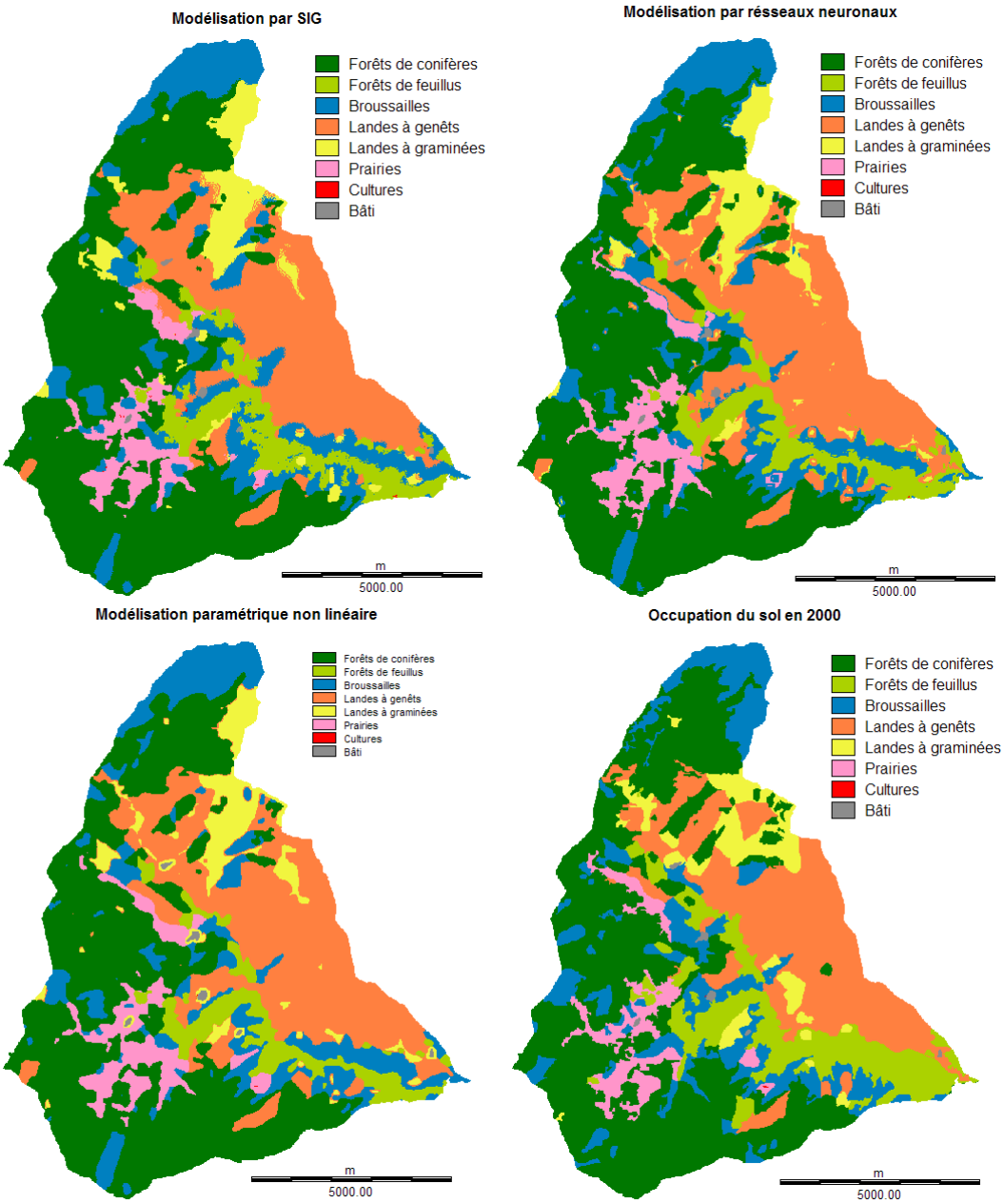


Fig. 93 : Simulations de l'occupation du sol pour 2000 et occupation du sol observée en 2000, Garrotxes

Le tableau 8 compare les résidus par catégorie en % de la surface observée de chaque catégorie mise à part les cultures dont le nombre de pixels tend vers zéro. Le premier enseignement de ce tableau est la relative concordance des résultats des trois approches. On constate que la simulation des modalités peu sujettes aux transformations (forêt de conifères, landes à genêt et prairies dans une moindre mesure) est plus facile que celle des catégories d'occupation du sol ayant un caractère plus transitoire. Ainsi, quel que soit le modèle, moins d'un pixel sur deux a été correctement prédit pour les catégories broussailles et landes à graminées.
Les taux de prédiction globale des trois méthodes sont très proches : 72.8 % (SIG), 74.3 % (réseaux neuronaux) et 72.8 % (modèle paramétrique).

Occupation du sol	Forêt de conifères	Forêt de feuillus	Broussailles	Landes à genêt	Landes à graminées	Prairies
Surface (%)	40.9	11.7	15.1	21.6	5.7	4.8
Résidus (%) de modélisation : SIG (27.2%)	11.42	55.28	51.92	17.13	54.39	30.35
Réseaux de neurones (25.7%)	10.60	45.84	54.54	16.23	59.38	19.26
Modèle paramétrique (27.2%)	11.88	51.65	57.07	14.35	59.24	25.57

Tab. 8: Pourcentage de résidus (mal prédits) par catégorie d'occupation du sol et par approche modélisatrice

Les modélisations n'ont pas vocation à prédire la réalité mais peuvent nous aider à mieux comprendre des changements spatio-temporels environnementaux et sociaux complexes. Dans ce sens, l'interprétation des résultats des modélisations doit tenir compte des limites des modèles. La modélisation de l'occupation du sol signifie une simulation de ce que la réalité pourrait être, un scénario raisonné et quantifiable dans le contexte d'aide à la décision.
Cependant une interprétation minutieuse des résultats devrait nous permettre à améliorer le modèle et, par conséquent, le taux de prédiction. Dans ce sens, l'analyse focalise surtout sur les résidus.
La catégorie d'occupation du sol la plus représentée (les conifères) obtient un très bon score de prédiction alors que les broussailles, relativement présentes sur le territoire, obtiennent un très mauvais score (plus de la moitié de mal prédits). Diverses remarques permettent d'expliquer ces phénomènes et de penser à des stratégies d'amélioration de la prédiction. Tout d'abord, on peut constater que les broussailles sont la catégorie naturellement la plus dynamique sur un territoire caractérisé par un équilibre entre espace forestier et pastoral régi notamment par la gestion pastorale. Les broussailles sont également soumises le plus à des effets aléatoires : un feu de forêt, une coupe ou bien l'abandon de pâturage transforment en peu de temps une parcelle en broussailles ; ce sont des phénomènes complètement incontrôlables.
Bien que l'occupation du sol soit décrite de manière qualitative, ses différentes catégories s'échelonnent entre des formations fermées (forêt de conifères, forêt de feuillus) et ouvertes (cultures). Ces rangs paysagers permettent de quantifier l'erreur de prédiction, exprimée en nombre de catégories. Nous étendons ici le concept introduit au chapitre 2, § 3 à l'ensemble des modélisations réalisées (cf. tab. 9). Ainsi, quelle que soit la méthode de modélisation, pour environ la moitié des pixels mal prédits, l'erreur de prédiction n'est que d'une catégorie et ceci à une résolution spatiale élevée. Le nombre de résidus décroît fortement avec l'augmentation de l'écart entre état observé état simulé.

Ecart de prédiction	SIG	Réseaux neuronaux	Modèle paramétrique
1 catégorie	12.9	12.5	13.0
2 catégories	9.1	8.5	9.2
3 catégories	3.2	2.9	3.1
4 ou de 5 catégories	1 .9	1.8	1.9
Total résidus	27.2	25.2	27.2

Tab. 9 : Analyse des résidus (pixels incorrectement prédits) des simulations : écart en nombre de catégories entre état observé et simulé (en % de la surface totale)

Un autre aspect intéressant est la grande concordance des trois modèles (cf. fig. 94).

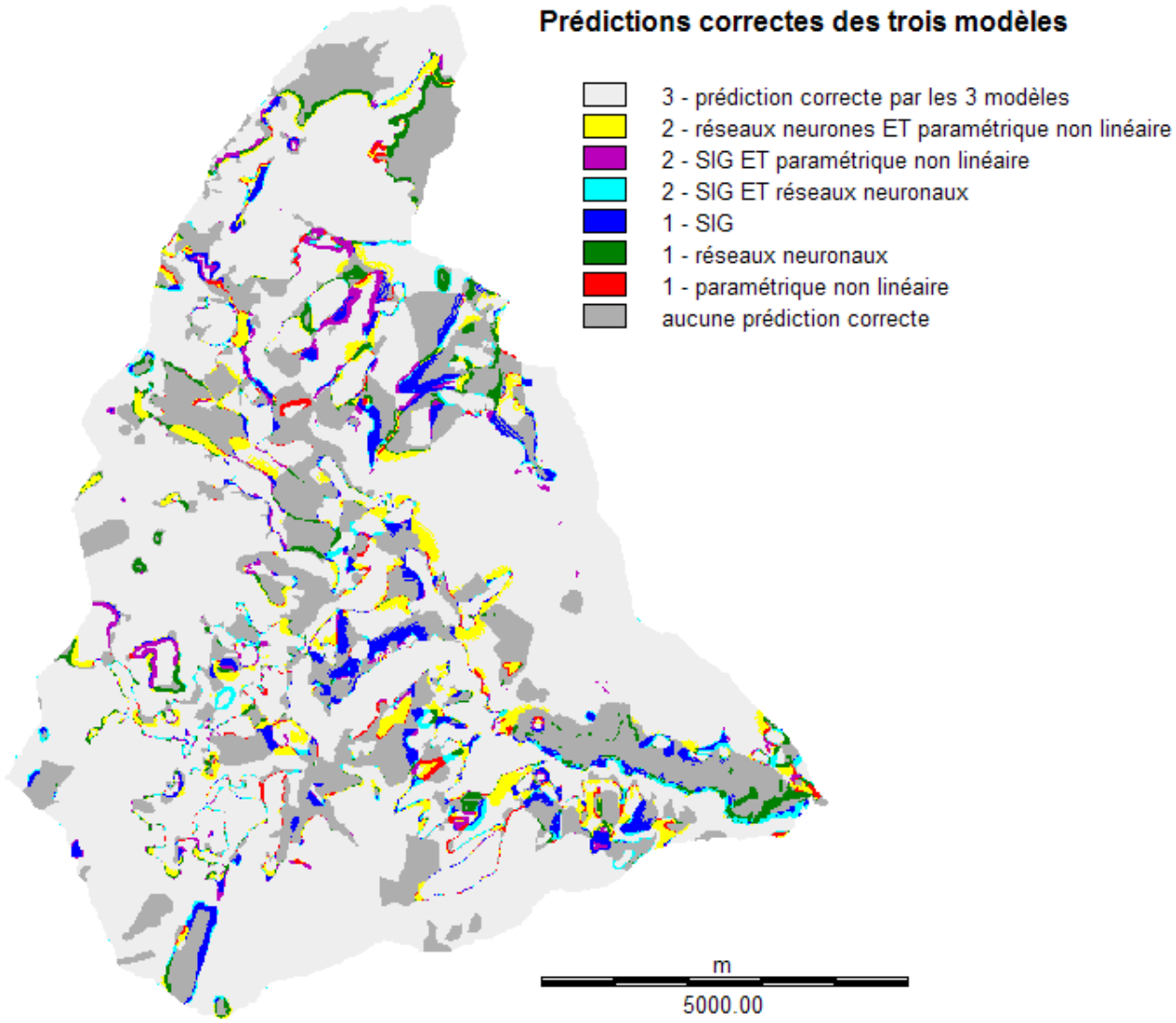


Fig. 94 : Croisement des résultats des trois modèles : nombre et nom des modèles simulant correctement l'occupation du sol observée en 2000

		2 modèles			**1 modèle**			Aucun modèle
Prédiction correcte par	**3 modèles**	RN + MPL	SIG + MPL	SIG + RN	SIG	RN	MPL	
Forêt de conifères	85.35	1.65	0.40	0.68	0.96	1.75	0.76	8.53
Forêt de feuillus	46.26	0.90	0.57	3.11	4.98	3.93	0.50	39.75
Broussailles	32.38	5.92	2.64	2.50	7.75	3.89	1.03	43.89
Lande à genêt	76.98	4.99	2.45	0.74	2.82	0.70	0.93	10.39
Lande à graminées	26.30	7.63	3.27	2.24	7.71	2.91	2.32	47.62
Prairies	59.14	11.64	1.66	4.70	1.06	5.26	1.99	14.55
Total	**66.49**	**3.75**	**1.42**	**1.54**	**3.23**	**2.33**	**0.92**	**20.32**

Tab. 10 : Mise en relation des scores de prédiction correctes des trois modèles avec l'occupation du sol observée en 2000 (en % de la surface totale). RN = modèle par réseaux neuronaux ; MPL = modèle paramétrique non linéaire ; SIG = modèle SIG

Le tableau 10 quantifie ce phénomène. Ainsi 66.5 % de la surface totale sont correctement prédites par chacun des modèles, 20.3 % par aucune. Un autre enseignement du croisement des pixels correctement prédits par les différents modèles est la similitude des résultats des deux modèles statistiques. Ainsi les surfaces correctement prédites par deux modèles sur trois le sont le plus souvent par les réseaux neuronaux et le modèle paramétrique non linéaire (3.75 %). Le taux de prédiction combiné de la méthode SIG avec chacun des modèles statistiques est nettement plus faible. La relative distinction du modèle SIG est corroborée par l'extension des surfaces correctement prédites par seulement une des approches : 3.23 % par le modèle SIG contre 2.33% et 0.92 % par réseaux neuronaux et modèle paramétrique non linéaire. Un croisement des surfaces correctement prédites par toutes les combinaisons des trois modèles avec l'occupation du sol réelle en 2000 souligne ce constat. Ainsi, pour les surfaces correctement prédites par uniquement deux modèles, cinq catégories d'occupation du sol sur six le sont par les approches statistiques. A l'inverse, les surfaces uniquement prédites correctement par un seul modèle le sont le plus souvent par le modèle SIG (quatre catégories d'occupation du sol sur six). La fig. 95 illustre graphiquement les données du tableau 10. Le premier enseignement de cet histogramme est que le choix du modèle ne joue qu'un rôle marginal sur le taux de pixels correctement prédits et ceci pour toutes les catégories d'occupation du sol. Cependant, leur association apporte un gain de prédiction certain. Ainsi, pour les catégories posant le plus de problèmes à la modélisation (broussailles et landes à graminées) dont le taux de correctement prédits ne dépassent pas respectivement 48.1% et 45.6 % quel que soit le modèle employé, leur association permet d'obtenir des scores améliorés (56.1 % et 52.4 %). La figure 95 montre également des comportements spécifiques des trois modèles selon la catégorie d'occupation du sol considérée. Ainsi au-delà du degré de prédiction de chacun des modèles l'apport des deux modèles statistiques pour la catégorie des prairies apparaît clairement. Il en va de même pour notre modèle SIG qui, pour les catégories de broussailles et de landes à graminées notamment, semble être plus performant que les deux autres modèles.

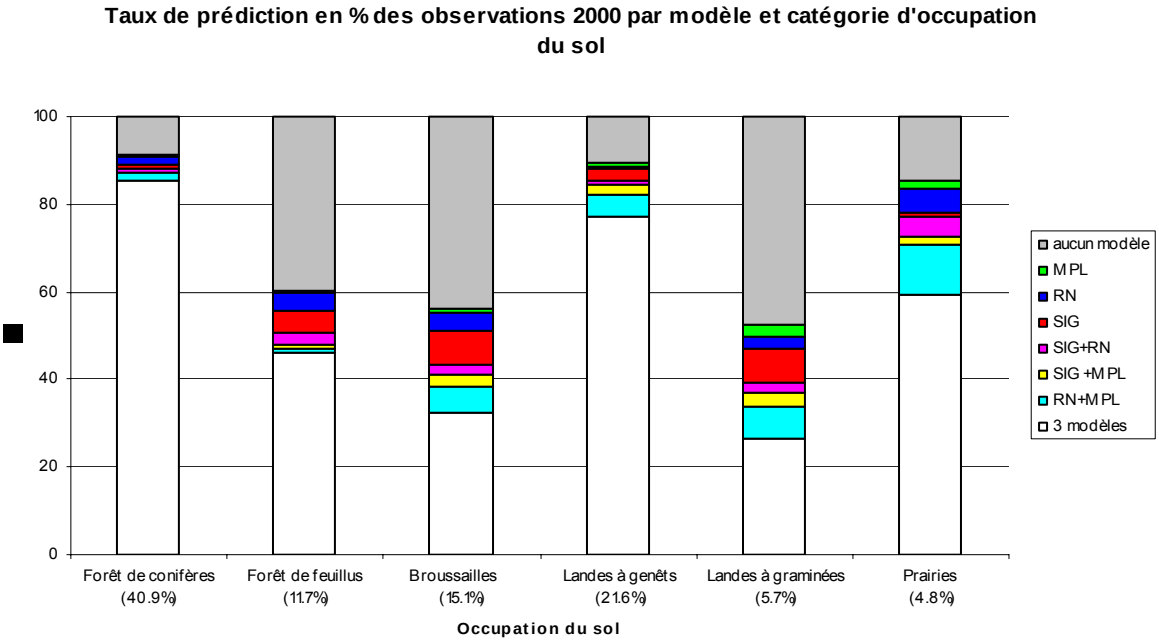


Fig. 95 : Histogramme des fréquences (% des observations, 2000) des taux de prédiction par modèle et catégorie d'occupation du sol

Intéressons-nous de plus près à la dynamique passée (phase d'apprentissage) et simulée (prédiction) de l'occupation du sol. La modélisation englobe trois états de l'occupation du sol : deux durant la phase d'apprentissage (1980 et 1989), le dernier étant la date de simulation : 2000. Le tableau 11 indique le nombre de changements intervenus (aucun, un ou deux) durant cette période et le met en relation avec le degré de prédiction des différentes combinaisons des trois modèles.

	Stable: 58.9 %	1 changement: 30.1%	2 changements: 11%
Observation	58.87	30.16	10.97
3 modèles	93.50	35.28	9.51
2 modèles:RN+MPL	2.89	5.89	2.47
2 modèles: SIG+MPL	0.96	2.16	1.85
2 modèles: SIG+RN	0.79	1.97	4.29
1 modèle: SIG	0.47	6.12	9.79
1 modèle: RN	0.50	4.36	6.44
1 modèle: P	0.32	1.31	3.05
Aucun modèle	0.57	42.92	62.61
Total	100.00	100.00	100.00

Tab. 11 : Nombre de changements d'occupation du sol durant la période 1980 – 1989 – 2000 et pixels correctement prédits par les différents modèles

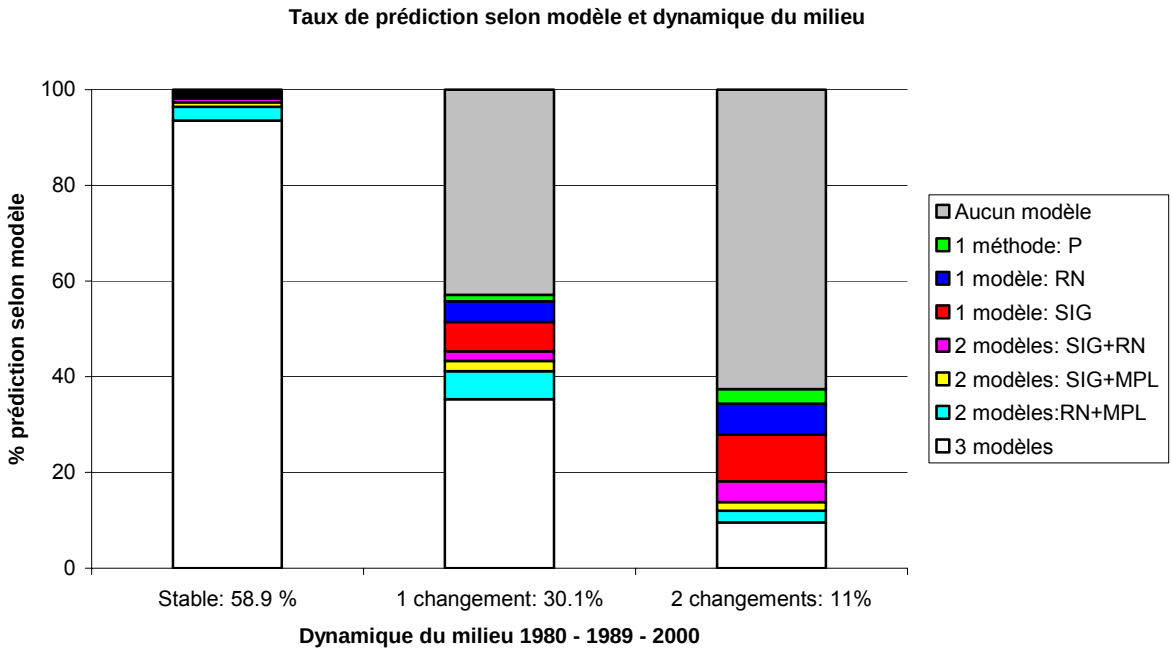


Fig. 96 : Nombre de changements d'occupation du sol durant la période 1980 – 1989 – 2000 et pixels correctement prédits par les différents modèles

Le tableau 11 est sa représentation graphique (fig. 96) montrent une relation nette entre le degré de dynamique du milieu et le taux de pixels correctement prédits au bon endroit. Ainsi

les trois modèles simulent plus de 93 % des surfaces stables. Ce taux baisse à environ 35 % des pixels ayant connu un changement d'état durant la période considérée pour descendre à moins de 10 % pour les zones ayant changé à chaque instant. Réciproquement le taux de résidus incorrectement simulés par tous les modèles augmente de moins de 1 % à plus de 62 %. En examinant l'apport supplémentaire de chacun des modèles ou de l'association de deux d'entre eux, on constate que :

- Les modèles statistiques (modèle paramétrique non linéaire et réseaux neuronaux) sont plus performants pour les surfaces restées stables. Ce gain, par rapport au modèle SIG, est cependant marginal.
- Le modèle SIG est plus performant pour les milieux ayant subi des transformations. Ainsi l'apport le plus significatif au socle de prédiction assuré par chacun des trois modèles, est celui du modèle SIG : 6.12 % pour les zones pour lesquelles un changement a été observé et 9.79 % pour les zones ayant connu deux changements.

Nous attribuons la meilleure prise en charge des zones dynamiques par le modèle SIG par l'élaboration supervisé (EMC) des règles d'allocation spatiale des probabilités de transition calculées. En effet, les écarts des probabilités de transitions prédites par les trois modèles à l'observation sont presque identiques en sommant la différence absolue entre observation et simulation des différentes catégories d'occupation du sol indiquée dans le tableau 7. Par contre, le principe d'allocation spatiale des probabilités de transition diffère fondamentalement entre les modèles statistiques (approche d'auto-élaboration de la base de connaissances) et modèle SIG où l'évaluation multicritère guidée par le modélisateur repose sur une analyse géographique de la dynamique du milieu durant la phase d'apprentissage.

Les résultats font également ressortir certaines limites des modélisations :

- Des zones stables pendant la phase d'apprentissage sont généralement prédites stables par l'analyse des chaînes de Markov (ACM). Les procédures d'EMC/EMO et l'automate cellulaire ne gèrent que ra répartition spatiale des probabilités de transition calculés par l'ACM. Cette restriction est, en partie, aussi valable pour les approches statistiques. Ainsi le modèle par réseaux neuronaux ne tient compte que des pixels frontières.
- La variable étudiée (occupation du sol) est décrite par un nombre limité de catégories. Ce choix, intentionnel, est motivé par la qualité et l'origine des données source afin de minimisez les erreurs d'interprétation. L'inconvénient est une certaine variabilité à l'intérieur de chaque catégorie qui n'est pas prise en compte par les modèles. Ainsi peut-on voir dans les trois cartes de modélisation (fig. 93) une vaste zone prédite en broussailles dans le secteur sud-est qui est réellement occupée par des bois de feuillus. Pendant la période d'apprentissage cette zone a été photo-interprétée comme broussailles en 1980 et en 1989. Cependant les broussailles se sont densifiées, leur composition floristique a changé au profit de Quercus ilex formant une strate arborescente dominante en 2000 où la zone a été classée forêt de feuillus.
- La phase d'apprentissage est peu fournie. Les modélisations ne se basent que sur deux instants connus. Ceci pose des problèmes par rapport à la source de données à utiliser. En l'occurrence il s'agit de données à haute résolution : les missions de photographies aériennes sont espacées dans le temps au point que l'utilisation de missions plus anciennes nous semble problématique sachant que le contexte socio-économique a beaucoup évolué.

- Finalement chaque modèle est affecté par un bruit aléatoire. Des effets aléatoires comme des incendies de forêt, du chablis ou des programmes de reforestation sont difficilement prévisibles.

Perspectives

Nous jugeons ces premiers résultats intéressants et avons identifié plusieurs domaines laissant entrevoir un potentiel d'amélioration de notre modèle. Ces marges de progression restent toutefois à confirmer par l'application des deux modèles statistiques sur le site d'études espagnol, voire par une application des trois modèles sur un site tiers.
Néanmoins l'interprétation des résultats déjà obtenus a permis d'identifier plusieurs pistes de réflexion que nous allons discuter plus en détail dans la partie III:

- La représentation de la variable étudiée : quelle est le nombre optimal de catégories pour décrire l'occupation du sol ? Peut-on approcher l'occupation du sol par des données autres que qualitatives ?
- Les sources d'information : selon la vitesse de dynamique du milieu, n'est-il pas indiqué de recourir à des capteurs offrant, outre une résolution spatiale élevée, une répétitivité temporelle permettant d'alimenter davantage la phase d'apprentissage ?
- Les variables d'environnement : pour des raisons pratiques nous nous limitons à un nombre restreint de variables potentiellement explicatives de l'état spatialisé et de la dynamique temporelle de la variable étudiée. D'ailleurs quel que soit leur nombre et fussent-elles disponibles, une part plus ou moins importante de la variabilité de l'occupation du sol ne pourra pas être expliquée. Dans quelle mesure notre modèle peut-il intégrer les méthodes de prise en compte d'incertitude et de manque de données ?
- La conception d'un modèle intégrant les points forts respectifs des trois modèles : y a-t-il des barrières méthodologiques ou techniques à un couplage de compartiments issus des différents modèles ?

III. Perspectives

Dans cette dernière partie, nous prenons comme point de départ nos activités de recherche – et leur imbrication dans l'enseignement – présentées au cours des deux premières parties (cf. chapitre 3, partie I et chapitres 2 à 4, partie II). Parmi ces recherches certaines ont été menées à leur terme, mais la plupart d'entre elles sont en cours, d'autres ne font qu'émerger. Nous allons, dans les pages suivantes, décrire les grandes orientations que nous nous proposons de leur donner dans les années à venir. Celles-ci s'avèrent être, selon la nature et le stade d'avancement des travaux, plus ou moins concrètes. Si, pour certains champs de recherche, nous pouvons d'ores et déjà faire état d'un programme bien articulé, d'autres recherches, entamées depuis peu, ne seront qu'ébauchées à grands traits.

Dans un premier chapitre, nous reprenons l'essentiel des problématiques que nous comptons développer dans les prochaines années en matière de modélisation et de simulation prospective de l'occupation du sol, en prenant en compte plusieurs scénarios environnementaux induits par des facteurs humains et naturels. Parallèlement, un certain nombre de nouvelles ouvertures thématiques, déjà lancées ou en cours de lancement, sont présentées dans le chapitre deux. Enfin, dans le chapitre trois, on abordera quelques uns des aspects relatifs à la valorisation et aux conditions d'applicabilité de nos recherches, avant d'esquisser une brève réflexion sur une pédagogie de la géomatique en géographie.

Chapitre 1. Perspectives en matière de modélisation et de simulation prospective

Le modèle géomatique combiné de simulation prospective de l'occupation du sol, que nous avons présenté dans la seconde partie de ce travail, a été appliqué à deux sites d'études : les Garrotxes au cœur du massif du Madrès-Coronat (Pyrénées Orientales) et la Alta Alpujarra Granadina (Sierra Nevada, Andalousie). La validation du modèle, par comparaison avec la réalité observée sur ces deux terrains, s'est révélée encourageante à deux égards : d'une part, ces premiers résultats obtenus nous semblent globalement satisfaisants et, surtout, ils laissent entrevoir une marge de progression importante. C'est sur cet aspect que nous nous proposons de travailler dans les années à venir :

- Elargir la base statistique de validation par application à d'autres sites.
- Affiner la représentation de la variable étudiée et améliorer les procédures d'évaluation multicritère à la base de la répartition spatiale des probabilités de transition markoviennes.
- Enfin, ouvrir le modèle à la prise en compte de l'incertitude.

Parallèlement à l'optimisation de notre modèle, nous envisageons d'élargir notre réseau scientifique à travers des projets de recherches menés en partenariat avec des collègues (contacts en cours de formalisation) travaillant sur la même problématique avec, pour certains d'entre eux, une méthodologie très proche de la nôtre. A cela s'ajoute que l'interprétation des résultats croisés des trois modèles appliqués au site pyrénéen nous invite à expérimenter leur couplage, de façon à tirer profit de leurs potentialités respectives. Afin d'inscrire les simulations prospectives dans des fourchettes d'évolutions possibles, nous travaillons à les placer dans des scénarios de dynamiques induits aussi bien par des facteurs humains (gestion pastorale) que par des facteurs physiques (quoique consécutifs aux activités humaines) comme le réchauffement climatique et ses conséquences notamment sur la couverture végétale et la gestion du milieu. Enfin, il nous semble primordial de cerner les limites de généralisation du modèle quant à son applicabilité à d'autres environnements – autant de pistes que nous allons explorer brièvement.

1.1. Mise en œuvre et validation sur d'autres terrains

L'application de notre modèle géomatique combiné de simulation prospective de l'occupation du sol à deux terrains (Garrotxes, Alta Alpujarra Granadina) génère des résultats proches pour des sites dont la vitesse de dynamique paysagère est pourtant très différente (cf. partie II, chapitre 2, § 3). Les différences de prédiction s'expliquent, selon les conclusions que nous pouvons tirer à ce stade de recherche, notamment après l'analyse des résidus, c'est-à-dire des pixels mal prédits, essentiellement par la plus grande stabilité temporelle du site espagnol. Cependant, ces conclusions restent à confirmer. Pour cela, nous envisageons d'appliquer notre modèle, en premier lieu, sur le site d'études du Centre de Biogéographie-Ecologie FRE 2545 CNRS en Haute Provence, la Montagne de Lure, site reconnu comme observatoire de l'environnement dans le cadre des projets du PEVS CNRS et qui fait l'objet d'études

approfondies depuis une dizaine d'années notamment de la part de Pierre Pech, de Laurent Simon et de Martine Tabeaud (cf. Pech, 2001, Pech et al., 1995, 1997, 2000 ; Simon, 1997a, 1997b, 1999; Simon et al., 1996, 1999, 2000; Tabeaud et al. 2004). D'autres terrains d'application sont envisagés (cf. élargissement du réseau scientifique, ci-dessous).
Parallèlement les modèles mathématiques – modèle paramétrique non linéaire et modèle par réseaux de neurones (cf. partie II, chapitre 3) –, en cours d'application sur le site espagnol, devraient être mis en œuvre sur les mêmes sites.
Dans un contexte voisin, signalons également notre participation à un axe de recherche en matière de simulation paysagère rétrospective (occupation, parcellaire, pression humaine, aménagements, …) de l'équipe de Mayte Camacho Olmedo à l'IDR (Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Granada), appliquée à la Alta Alpujarra Granadina. Inscrit dans le programme de recherche portant sur la modélisation de l'occupation du sol en milieu montagnard et financé par la CICYT (cf. tome II, chapitre 2), il s'agira de reconstituer les paysages et, notamment les formes d'occupation du sol, à trois dates dans le passé, particulièrement bien documentées (Garcia Martinez, 1999): 1571, 1752 et 1857. Dans le cadre de ses recherches doctorales, Garcia Martinez (IDR) a rassemblé, grâce à une exploitation minutieuse de documents d'archives, une masse d'informations historiques très exhaustives sur cette zone. Ainsi, nous connaissons, pour les dates indiquées, entre autres, le nombre d'habitants et la structure démographique et socio-économique de la population, le parcellaire agraire (taille des exploitations, nombre de parcelles par exploitation) et les cultures annuelles et pluriannuelles (avec un chiffrage des pieds pour l'arboriculture). Un usage prudent de ces statistiques agricoles, couplé aux conditions du milieu, qui n'ont pas été modifiées de manière significative (notamment le réseau d'irrigation, paramètre fondamental de l'agriculture irriguée, datant de l'époque arabe, ne semble pas été touché dans sa structure) permettra de proposer des cartographies rétrospectives de ce milieu agraire plurimillénaire.

1.2. Affiner la variable étudiée

Les simulations réalisées jusqu'à présent traitent la variable étudiée, l'occupation du sol, comme une variable qualitative au sens statistique du terme. Ainsi, les différents états réalisables de l'occupation du sol sont représentés par des catégories ayant, chacune, une variabilité interne plus ou moins importante. Aussi bien leur nombre que leur caractère qualitatif sont à l'origine d'une part non négligeable de résidus de la simulation (cf. notamment partie II, chapitre 4). Pour remédier à ce problème de la prise en compte plus fine de la dynamique, nous proposons une représentation mixte de l'occupation du sol : sous forme qualitative (les catégories mentionnées) et sous forme ordonnée pour la strate arborescente (classes de taux de couverture). Cette approche ordonnée du couvert arborescent, au cœur des dynamiques entre forêt et espaces pastoraux (cf. Doukhan, 2003), s'appuie sur une nouvelle photo-interprétation à haute résolution (en cours) qui, elle-même se base sur un traitement préalable : leur orthorectification – une étape achevée pour le site des Garrotxes (Gaviano, 2004 ; Gomes Zotano, 2004). Les premiers résultats, partiels, de la photo-interprétation du taux de couverture de la strate arborescente, laissent présager que ces données sont susceptibles de remédier à un certain nombre de prédictions erronées, comme par exemple celle d'une vaste zone le long du Cabrils (vallée principale des Garrotxes), occupée par des broussailles durant la phase d'apprentissage et prédite comme telle, par les trois modèles, mais étant devenue une chênaie verte, à la date de validation, en 2000 (cf. fig. 93).
Parallèlement, toujours sur le site des Garrotxes, nous sommes en train de densifier la phase d'apprentissage en y ajoutant une date supplémentaire (1995).

1.3. Améliorer l'explication spatio-temporelle de l'occupation du sol à travers les variables d'environnement dans le cadre de l'évaluation multicritère

L'interprétation croisée des résultats de notre modèle et des deux modèles mathématiques (cf. partie II, chapitre 4), montre, globalement, des performances très proches, avec cependant des taux de prédiction meilleurs de notre modèle géomatique pour des espaces connaissant un changement d'état répété (cf. tab. 11). Afin d'optimiser notre modèle, mais également dans la perspective d'un couplage des modèles, nous porterons une attention particulière à l'amélioration des procédures déterminant les règles d'allocation spatiale des probabilités de transition markoviennes. Pour cela, nous réfléchirons sur la significativité des variables d'environnement de type holistique, potentiellement explicatives de l'état de la variable étudiée. Parallèlement, nous chercherons à savoir s'il existe un estimateur simple du potentiel dynamique des catégories d'occupation du sol.

1.4. Ouvrir le modèle à l'incertitude

Pratiquement tous les modèles, à l'exception de la catégorie des modèles entièrement déterministes, doivent gérer soit des connaissances lacunaires, soit des degrés variables de confiance dans les données, voire les deux à la fois. Le théorème de Bayes (loi des probabilités) est notamment employé pour estimer la probabilité d'événements au vu de résultats d'observations (en l'occurrence, issus de la phase d'apprentissage). Plus concrètement, on estime qu'un phénomène appartient à un ensemble d'états (les hypothèses). L'approche bayésienne (cf. Lee et al., 1987) évalue la probabilité que chacune de ces hypothèses est vraie et ceci sur la base d'une évidence (probabilité conditionnelle) connue (introduite par les règles du comportement spatio-temporel issues de la phase d'apprentissage).
La théorie de Dempster-Shafer (cf., entre autres, Gordon et Shortliffe, 1985 ; Estman, 2003) permet d'inclure dans les calculs à la fois l'imprécision (comme la logique floue), l'incertitude mais aussi l'ignorance partielle ou globale. Elle rend possible la modélisation d'une grande variété de situations. Dans notre cas, elle permet d'introduire l'ignorance et l'incertitude dans l'évidence bayésienne.
Les deux algorithmes, faisant partie des procédures d'aide à la décision, sont implémentés dans le logiciel Idrisi. Nous comptons les utiliser afin d'affiner l'évaluation multicritère.

1.5. Elargir le réseau de partenariat scientifique

Dans le contexte de la simulation prospective de dynamiques environnementales, l'élargissement de notre réseau de coopération scientifique, que nous jugeons primordial, est en cours et se concentre, au-delà d'une insertion dans le réseau national Cassini, sur les institutions suivantes :

- Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Unidad Académica Morelia. Une réponse commune au prochain appel d'offres ECOS-Nord est en préparation avec Jean-François Mas, chercheur qui travaille

dans un champ scientifique voisin et qui emploie des outils géomatiques très proches (Mas, 1999, 2004 ; Mas et al., 2004).

- Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná CEFET-PR), Brésil. Une coopération avec Tania Mezzadri-Centano (cf. Partie II, chapitre 1, § 6) et Gilles Selleron (GEODE UMR 5602 CNRS) est prévue pour appliquer notre modèle géomatique et leur modèle, basé sur la logique floue, à un front pionnier tropical au Guatemala utilisant des données télédétectées (cf. Métailié et al., 2002).
- Geographisches Institut der Universität Hannover, Allemagne. Une coopération avec Gerald Kuhnt, spécialisé en procédures géostatistiques et écologie des sols (cf. Fränzle et Kuhnt, 1999), est envisagée à partir de 2005.
- Une coopération informelle avec le laboratoire DYNAFOR UMR 1201 INPT-ENSAT/INRA existe depuis quelques années. Ce groupe de recherche s'investit depuis longtemps dans l'étude des dynamiques environnementales, qui l'a amené à s'intéresser, depuis peu, à la simulation prospective de l'occupation du sol dans les Coteaux de Gascogne (cf. Ladet et al., 2004).

1.6. Coupler le modèle géomatique combiné aux modèles mathématiques

Comme mentionné à la fin de la partie II (chapitre 4), les résultats provisoires des simulations prospectives par modèle géomatique combiné et par modèles mathématiques, appellent un couplage méthodologique dont les conditions théoriques et les procédures de mise en oeuvre commencent à être étudiées.

1.7. Construire des scénarios prospectifs

La simulation prospective de l'occupation du sol, telle que nous l'avons présentée jusqu'à présent, sous-entend la continuité des paramètres macrosystémiques. En se basant sur les événements de la phase d'apprentissage, elle exclut, par exemple, une modification notable de la politique agricole commune (PAC) dans le secteur des subventions à l'agriculture en montagne, ou bien une remise en cause fondamentale de la gestion pastorale ou encore un changement des conditions climatiques lié au réchauffement global. Vue sous cet angle, la simulation propose un scénario prospectif probable dans la continuité des évolutions du passé récent. Loin d'être dépourvue d'intérêt, cette modélisation fournit une sorte d'étalonnage pour d'autres scénarios prospectifs, fondés cette fois sur la modification d'un ou de plusieurs paramètres à l'échelle macro. Par conséquent, de telles simulations sont capables de proposer une fourchette probabiliste des évolutions attendues sur la base d'hypothèses faisant intervenir la modification de facteurs exogènes. Par ce biais, notre intention est d'insérer les simulations prospectives, déjà entreprises et à venir, dans un cadre plus souple, calé sur des évolutions hypothétiques pressenties : l'aide à la décision.
En collaboration avec le Centre de Biogéographie-Ecologie FRE 2545 CNRS, nous nous proposons de réaliser deux types de scénarios d'évolution environnementale (recherches entamées dans le cadre du dernier programme PEVS du CNRS, cf. partie I, chapitre 3, § 4), l'un avec une entrée naturaliste, l'autre à entrée sociétale. Les deux types de scénarios, mis en

œuvre sur les sites respectifs des Garrotxes et de la Montagne de Lure, se présentent de la façon suivante :

- Scénarios simulant les conséquences du réchauffement climatique :
  Basé sur l'hypothèse du réchauffement planétaire attendu, nous proposons un scénario spatialisé et paramétrable simulant les conditions climatiques pour les prochaines décennies. Un intérêt particulier sera porté aux modifications de quelques paramètres environnementaux (bilan hydrique des sols, dynamiques végétales, enneigement, …) et leur impact sur les paysages des milieux montagnards méditerranéens ainsi que sur leurs modes de gestion.

  - Augmentation des températures : le forçage climatique se traduit prioritairement par une tendance à la hausse des températures, avec une diminution des gels et une remontée des isothermes en montagne. Le réchauffement s'exprime par un glissement de l'étagement écologique vers le haut des versants, qui peut entraîner la mutation des écosystèmes, voire une érosion de la biodiversité (Loreau et al., 2002). L'autre conséquence de ce réchauffement est la diminution des précipitations solides. La neige, en particulier en Montagne de Lure, représente une ressource potentielle menacée pour la pratique du ski et l'économie du tourisme.
  - Augmentation des précipitations : les précipitations ont augmenté de 0,5 à 1% par décennie au cours du 20ème siècle dans les régions tempérées (Moisselin, 2002), et cette hausse des quantités précipitées concerne essentiellement la saison froide. En haute altitude, au-delà de 2000 m, l'augmentation des précipitations neigeuses est attendue alors qu'en deçà, la hausse des températures devrait multiplier les pluies hivernales, limitant l'épaisseur et la durée du manteau neigeux (Tabeaud et al., 2004).
  - Une augmentation des précipitations orageuses (Tabeaud et al., 2004). Les scénarios actuels ont montré un accroissement des tempêtes sur les littoraux (Houghton et al., 2001). Ces tempêtes correspondent souvent à des flux d'air méditerranéen dont les trajectoires s'infléchissent en montagne. Les ascendances orographiques accentuent le caractère intense des épisodes pluvieux. Cette augmentation de la convection peut entraîner une recrudescence de la torrentialité en montagne.
  - Une sécheresse estivale prononcée. Le forçage climatique se traduit par la diminution des précipitations estivales. La rareté des pluies et l'accroissement des températures favorisent l'augmentation du prélèvement par l'évaporation, stress hydrique qui agit directement sur les écosystèmes. La modélisation de l'état des réserves hydriques représente un outil qui permet d'influer sur les potentialités de gestion des écosystèmes en montagne méditerranéenne.

- Scénarios simulant les conséquences des modifications de l'activité pastorale :
  L'hypothèse de départ considère qu'il y a un état initial, les pratiques pastorales actuelles et qu'il existe une modification de ces pratiques pouvant intervenir à différents niveaux :

  - Pression pastorale (charge UGB / ha)
  - Composition du bétail[17]
  - Gestion pastorale : Associations Foncières et Pastorales, unités pastorales, leur équipement et les modes de guidage du bétail : clôture / berger
  - Nettoyage des pâtures : feu pastoral, fauchage, abandon de ces pratiques

[17] On assiste dans les Garrotxes, depuis environ dix ans, à une recomposition spécifique : moins d'ovins, davantage de bovidés et d'équidés

L'éventail des scénarios est très large et s'étend, théoriquement, de l'abandon des activités pastorales à leur intensification et rationalisation poussées au-delà des potentialités du milieu. Des enquêtes auprès d'organismes cadres (SIME, Service Interchambre d'agriculture Montagne Elevage) permettront de dégager des tendances probables pour l'avenir proche.
Ces changements simulés dans l'activité pastorale se traduiront sous forme d'indicateurs d'évolution (contraintes et facteurs) susceptibles de remplacer partiellement (ou de la compléter) la base de règles du comportement spatio-temporel servant à la simulation prospective. Par cette entrée, on cherche à voir quelles sont les conséquences de ces scénarios sur les modifications de certains paramètres environnementaux : bilan hydrique des sols, dynamiques végétales, … et, par conséquent, sur les paysages et leurs modes de gestion.

1.8. Evaluer les possibilités de transfert et de généralisation du modèle

Tout modèle, abstraction de la réalité, prétend échapper à la singularité du cas d'étude pour lequel il a été conçu initialement. En l'occurrence, il s'agira d'entreprendre cette forme de validation du modèle qui consiste à décrire son comportement dans des environnements différents. Sur la base des résultats issus des différentes pistes de recherche, mentionnées ci-dessus, visant l'amélioration de la simulation prospective, leur analyse critique devrait fournir des indications sur l'éventail potentiel et les modalités d'application du modèle. Une description des métadonnées du modèle, accompagné d'un guide de mise en œuvre, est prévue.

Chapitre 2. Nouvelles ouvertures thématiques

Dans le cadre des axes de recherche de mon laboratoire, je m'inscris prioritairement dans les thématiques portant sur le temps, l'histoire et les dynamiques de l'environnement ainsi que dans la gestion des environnements et des territoires (cf. tome II, chapitre 2). C'est dans ce contexte que je compte développer un certain nombre de travaux récemment entamés et mentionnés dans la partie I (chapitre 3,§ 4).

2.1. Création, recréation et permanence des vignobles de qualité

Ce programme du GEODE UMR 5602 CNRS, sous la responsabilité de Jean-Christian Tulet, a d'ores et déjà donné lieu à un certain nombre de publications (Tulet, 2001 – création de l'appellation Vins des Coteaux de Quercy; Pech et Tulet, 2002 - mutations spatiales du vignoble de Midi-Pyrénées; Tulet et Sanchez Alvarez, 2002 – croissance du vin du Chili ; Levoyer et Fall, 2004 – SIG et dynamique du vignoble de Cahors).
Dans le cadre de ce programme, nous avons mené une étude préalable portant sur l'évolution du vignoble andalou (Camacho et al., 2004). Celle-ci nous a conduit à solliciter une Action Intégrée franco-espagnole intitulée : « Dynamique spatio-temporelle du vignoble andalou. L'exemple de la reconstruction du vignoble de la Sierra de la Contraviesa. » (demande déposée en mai 2004).
Il s'agit de mener une étude géographique, centrée sur l'espace, son organisation, les raisons sociales et économiques de sa réorganisation, plutôt qu'une étude uniquement agraire qui se limiterait à l'analyse de la culture et de ses formes de production et / ou de commercialisation. En particulier, il est question de vérifier si le « modèle français » des petits vignobles s'applique au sud de l'Espagne. En effet, mis à part les grandes régions viticoles prestigieuses, on observe en France, depuis une quarantaine d'années, une contraction de la vigne sur quelques territoires bien identifiés. Ainsi on est passé d'une viticulture paysanne spatialement très diffuse à une viticulture de qualité et d'appellation se concentrant et prospérant sur des territoires bien délimités. Nos premières recherches viticoles en Andalousie (Camacho et al. op. cit.) laissent penser que le même phénomène se déroule actuellement – et avec un décalage de dix à vingt ans – dans le sud de l'Espagne.
Contrairement à d'autres régions espagnoles, le vignoble andalou occupe une position plutôt marginale – en surface et en importance économique – exception faite des trois centres viticoles andalous que sont Jerez, Moriles-Montilla et Condado. Comparé aux oliveraies (notamment dans le Nord de l'Andalousie), aux cultures maraîchères sous serre (sur la côte) et aux plaines céréalières (le long du Guadalquivir), le vignoble paraît être une culture traditionnelle en déclin à l'instar de l'arboriculture non irriguée de montagne (la trilogie classique amandier, figuier, olivier). Une analyse plus détaillée révèle, certes, le recul général de la vigne en Andalousie, mais elle montre également une situation plus contrastée sur le plan local. Ainsi assiste-t-on à un phénomène de concentration de la vigne autour de quelques pôles soit d'excellence, soit de renouveau de la vigne paysanne (cf. fig. 54, partie I, chapitre 3, § 4) : le littoral des provinces de Huelva et de Cadiz, la région traditionnelle de viticulture dans la province de Cordoba et la chaîne littorale (dont la Contraviesa) s'étendant sur les provinces de Granada et de Alméria.
L'étude portera sur la Contraviesa, une chaîne littorale d'environ 500 km², de la province de Granada (Andalousie). Appelée également Alpujarra Baja Granadina, cette région se situe entre le versant sud de la Sierra Nevada (Alta Alpujarra) et la côte méditerranéenne. Le

phénomène le plus intéressant à observer est dual et contrasté : une agriculture non irriguée marginale sur les sommets et les moyens versants et une agriculture intensive irriguée sur sable et sous serre, très compétitive sur les bas versants et dans les « vegas » littorales. Cependant, on peut parler aujourd'hui d'une renaissance des activités agricoles et des services dans la montagne, notamment centrés autour de la vigne. La création de coopératives, l'amélioration de la commercialisation, l'investissement dans les infrastructures, ... sont quelques exemples des processus de revitalisation qui expliquent l'augmentation des surfaces en vignes et la valorisation du « vino de la Contraviesa » ou du « vino de la Costa » sur le marché.

2.2. Dynamique du paysage agraire à Cuba

Le GEODE UMR 5602 CNRS a une longue tradition de coopération scientifique avec Cuba. Différents programmes de recherche, axés sur les dynamiques environnementales et agraires, se sont relayés depuis le début des années 1990 (cf. tome II, chapitre 2). En coopération avec l'Institut de Géographie de l'Université de La Havane et la faculté d'Agronomie et de Foresterie de l'Université de Pinar del Río, nous avons entamé deux études portant sur les mutations de l'espace agraire :

- Les changements d'occupation du sol et des formes associées de production agricole dans la zone périurbaine sud de la capitale (cf. fig. 53, partie I, chapitre 3, § 4) suite à la « période spéciale », instaurée après l'arrêt de subventions en provenance de l'ex-URSS. Ces changements sont étudiés à partir de données télédétectées à haute résolution (SPOT 4-HVIR et SPOT 5-HRG), calées sur des observations au sol (publication en cours).
- La réorganisation de l'économie cubaine, entamée depuis une dizaine d'années, a modifié profondément les priorités agraires. En effet, l'ancienne et emblématique culture de la canne à sucre, jadis pourvoyeuse principale de devises, n'occupe plus qu'un rôle de second plan. Largement détrônée par le tourisme en tant que ressource de devises, de vastes espaces, consacrés jusqu'à un passé très récent à la monoculture de la canne à sucre, sont dorénavant délaissés et attendent une reconversion. Ce phénomène prend une ampleur exceptionnelle dans l'ouest de l'île – la province de Pinar del Río. Nos collègues de l'Université de Pinar del Río sont chargés (par le Ministère de l'Agriculture et celui de la Canne à sucre – c'est dire l'importance historique de la canne) d'élaborer un document cadre pour la reconversion des anciennes terres à canne à sucre dans cette province, s'inspirant des principes du développement durable. Notre rôle se limiterait au traitement numérique de l'information géographique : constitution d'une base de données géoréférencées et conception d'un atlas électronique des paysages agraires par données télédétectées et de terrain.

Cependant, ces projets dépendent largement de l'évolution des relations politiques, culturelles et scientifiques entre Cuba et l'Union Européenne en matière de coopération scientifique – relations officiellement interrompues depuis 2003.

2.3. Gestion de risques naturels

Nous avons fait état (partie I, chapitre 3, § 4) de notre contribution à de nombreuses recherches s'inscrivant dans la prévention de risques naturels. Outre une poursuite de ces travaux, qui ont, pour la plupart d'entre eux, un caractère appliqué, il s'agira d'y incorporer les avancées méthodologiques en matière d'aide à la décision (exposées dans la partie II, chapitre 2, § 1). Parallèlement, nous nous proposons une réflexion sur les protocoles, de plus en plus normés, d'élaboration de documents comme les PPR ou encore les PAFI, dont la rigidité est, dans certains cas, susceptible de porter préjudice aux résultats escomptés (cf. ci-dessous chapitre 3, § 2).

2.4. Gestion patrimoniale de l'environnement sahélien, lutte contre la désertification et conservation de la biodiversité

La concrétisation de cette ligne de recherche appliquée dépend de la suite que la commission compétente du Ministère délégué à la recherche et aux nouvelles technologies donnera à un projet d'action concertée initiative (ACI), déposé en juin 2004 dans la rubrique « sociétés et cultures dans le développement durable », et intitulé : « Approche interdisciplinaire pour une gestion patrimoniale de l'environnement sahélien en appui aux politiques de lutte contre la désertification et de conservation de la biodiversité [zone du Gourma et delta intérieur du fleuve Niger, Mali] ».
Comme mentionné dans le tome II, chapitre 2, il s'agit d'un projet pluridisciplinaire auquel participeraient cinq laboratoires, sous la direction d'Olivier Barrière, du Laboratoire d'Anthropologie Juridique de Paris (LAJP), rattaché à l'Université de Paris 1.

Le projet part du postulat qu'il faut décloisonner les rapports entre l'homme et la terre, trop souvent réduits à une vision uniquement centrée sur la propriété foncière, qui, à elle seule, ne peut suffire à appréhender les relations entre sociétés et milieu. Suivant cette approche, on peut dire que les rapports « fonciers-environnementaux » sont des rapports entretenus entre les hommes, qu'ils soient exploitants ou usagers, dans un contexte agricole, pastoral, halieutique, forestier, cynégétique ou de conservation des écosystèmes, à propos de la gestion, de l'exploitation, du prélèvement des ressources naturelles renouvelables et de la préservation de la biodiversité. La notion de « foncier-environnement » exprime ainsi, à travers les paysages, la relation de l'homme avec la nature en tant que reflet d'une conception du monde construite au cours du temps. Sur ces bases, la problématique centrale du projet consiste à définir les modalités d'une gestion patrimoniale de l'environnement sahélien en appui aux politiques de lutte contre la désertification et de conservation de la biodiversité. Pour ce faire quatre axes d'études, reposant sur un partage disciplinaire – droit, anthropologie, économie et sciences de l'environnement – doivent être traités. Concrètement, notre laboratoire interviendrait dans deux lignes de recherche :

- La caractérisation environnementale : suivi et analyse de l'état de l'environnement du Gourma et du delta intérieur du Niger, à laquelle devraient participer plusieurs membres de notre laboratoire.
- Le traitement numérique de l'information géographique, envisagé comme une ressource de connexion interdisciplinaire entre les différents participants au projet et mobilisant des techniques de modélisation environnementale et d'aide à la décision que nous avons employées pour la simulation prospective de l'occupation du sol.

Chapitre 3. De la valorisation de la recherche à la formation sous contrainte LMD

3.1. Valoriser la recherche autour d' « observatoires de l'environnement »

Au reproche que « la recherche française serait trop confidentielle » les organismes compétents (ministères, universités, CNRS et autres institutions de recherche) répondent, depuis quelques années, par une incitation à valoriser davantage les résultats de la recherche qui, trop souvent encore, ne sont partagés qu'au sein de leur discipline. Nous projetons de contribuer à cet effort de partage des savoirs – et au-delà d'un accroissement des publications en ligne – à travers la réalisation de vecteurs de valorisation appliqués à deux programmes de recherche ayant conduit, de facto, à l'établissement de véritables « observatoires de l'environnement ».

Le bassin versant d'Auradé

Le bassin versant d'Auradé, choisi et équipé initialement dans l'objectif exclusif de la lutte contre la pollution diffuse des eaux par les nitrates d'origine agricole, est devenu depuis un site d'études agronomiques et environnementales au sens large du terme. Des recherches, mesures et essais y ont été réalisés dans les domaines de la fertilisation raisonnée, de la pédologie et de l'aménagement paysager anti-polluant (cf. partie I, chapitre 3, § 2), de l'érosion, de la biodiversité, de la protection des végétaux et de la lutte contre les pesticides. Devenu le symbole d'une conciliation possible entre qualité de l'environnement et agriculture performante (au moins sur le plan de la pollution par les nitrates), Auradé bénéficie d'une accumulation de savoirs divers depuis 21 ans ; une connaissance cependant fragmentaire et peu partagée, malgré les efforts de l'Association des Agriculteurs d'Auradé, fondée il y a une dizaine d'années.
Nous proposons, dans le cadre d'une convention de partage des savoirs fondé sur la transparence, de valoriser ces résultats sous forme d'un site Internet multimédia englobant publications, statistiques, observations, rapports d'actions de recherche, documentation audiovisuelle (existante) et cartographie interactive.

Les milieux montagnards méditerranéens : Madrès-Coronat et Alta Alpujarra Granadina

La réalisation d'un CD-Rom multimédia et d'un site Internet ayant les mêmes fonctionnalités que celles, mentionnées ci-dessus, est prévue dans le cadre du projet de recherche de simulation prospective de l'occupation du sol, soutenu par le CICYT espagnol, dans une approche comparée des terrains d'études pyrénéen et andalou (chapitre 1, § 1).

3.2. De la recherche à l'action

La dualité recherche fondamentale – recherche appliquée, souvent évoquée, correspond, en fait, dans bien des cas, à une simplification abusive : on a plutôt affaire à un continuum de travaux scientifiques ayant des degrés d'application variés à courte, moyenne ou longue échéance.

En géographie de l'environnement, nombre de recherches ont un caractère appliqué. Parmi nos propres travaux (partie I, chapitre 3), nous rappelons les mesures antipolluantes, proposées dans le cadre de nos recherches doctorales au sujet de la pollution des eaux de surface par les nitrates, dont certaines ont été appliquées avec succès par la suite (enherbement des bords de ruisseaux, plantation de lignes d'arbres).
Beaucoup d'autres travaux, notamment en matière de prévention des risques d'inondation et d'incendie, ont une finalité pratique (PPR, PAFI) et débouchent sur des propositions concrètes d'aménagement et de gestion de l'espace.

En matière de simulation prospective, le débat sur la finalité pratique de la recherche porte, le plus souvent, sur l'applicabilité des modèles et la valeur prédictive des résultats simulés.
A ce sujet, nous avons déjà clarifié notre position (cf. partie II, chapitre 2) que l'on peut résumer ainsi : si la simulation prospective tend vers la prédiction, elle aide le chercheur à mieux appréhender le fonctionnement complexe des anthroposystèmes, facilite leur compréhension et la formulation de nouveaux questionnements, censés aller plus loin dans le domaine considéré. Dans ce contexte les méthodes d'aide à la décision évoquées prennent tout leur sens.

Nous nous limitons ici à faire état de deux types de recherche : le premier correspond à une action de recherche appliquée, l'autre à l'amorce d'une réflexion sur l'usage ordinaire de la géomatique et les *risques* qu'il peut engendrer en matière de prévention de risques.

Aide à la décision – la gestion intégrée des ressources pastorales

Dans le cadre d'un programme INTERREG 3 A franco-espagnol, intitulé « Gestión integrada de pastos pirenaicos a través de un Sistema de Información Geográfica », sous la responsabilité de Maria-Teresa Sebastià du Centre Technològic Forestal de Catalunya, notre laboratoire, est en charge de la constitution d'une base de données géoréférencées dans les deux zones pressenties : la Serra del Cadí et le Madres Coronat. Ce travail est en cours. Des procédures d'aide à la décision, notamment une évaluation multicritère (cf. partie II, chapitre 2, § 1), seront mises en œuvre pour proposer plusieurs scénarios de gestion intégrée de ces espaces pastoraux de part et d'autre de la frontière.

De l'usage des SIG en matière de prévention de risques

Si l'utilité du traitement numérique de l'information géoréférencée dans le processus d'élaboration des documents en matière de prévention de risques – 23 500 communes françaises sont exposées à au moins un risque naturel (Sénat, 2003) – et incontestée, certains praticiens ont adopté, par retour d'expérience, une approche plus critique quant à leur emploi (cf. Fayolle, 1999). La réalisation d'un PAFI en Montagne Noire audoise a soulevé plusieurs questions : la difficulté de quantifier certains aléas, enjeux et risques, la difficulté de leur pondération et ses conséquences tout au long du processus d'agrégation ainsi que la qualité de données utilisées (cf. partie I, chapitre 3, § 4). Vouloir standardiser les protocoles de réalisation de tels documents peut aboutir, dans certains cas, à utiliser une source de données ou à préférer un coefficient plutôt qu'un autre. Quelle que soit la qualité obtenue, le résultat revêt un caractère tranchant et figé, alors que nous avons affaire, dans le meilleur des cas, à des probabilités est, dans la pire des situations, à l'incertitude.
Dans ce domaine aussi, une étude critique des modes opératoires et des méthodes d'agrégation des données nous semble indiquée et l'intégration des méthodes d'aide à la décision déjà présentées, souhaitable.

3.3. La recherche par la formation : structuration d'un champ d'enseignement en géomatique

Formation par la recherche et recherche par la formation : les chercheurs de demain sont les étudiants d'aujourd'hui. Ce constat, banal, interpelle l'enseignant-chercheur et doit mener à un bilan critique de l'existant et à une actualisation périodique des cursus d'enseignement.

Comme en d'autres domaines, l'emploi de la géomatique en géographie est soumis à des impératifs souvent évoqués : usage à bon escient, progression pédagogique, articulation des cursus des différents diplômes et conception des contenus pédagogiques qui reflètent les progrès de la recherche et la demande sociale.
C'est sur ces bases qu'il nous semble important de réfléchir au développement d'une filière d'enseignement de la géomatique en géographie, dans la perspective de la réforme en cours organisant la formation entre les tris cycles licence – master – doctorat (LMD).

- Au niveau Licence

Au niveau des études supérieures de premier niveau (semestres 1 à 6), il s'agit d'adapter la formation aux usages géomatiques d'aujourd'hui et la réorienter dans la perspective du LMD. Pour la géographie à l'Université de Toulouse – Le Mirail (UTM), les précédentes réformes ont déjà augmenté la « lisibilité » et la progression pédagogique des enseignements dits « techniques » en les plaçant dans une perspective englobant les anciens niveaux diplômants qui sont le DEUG et la Licence. Parallèlement des pratiques géomatiques (cartographie assistée par ordinateur, gestion de bases de données, SIG, télédétection, usage de l'Internet) ont été introduites.

Aujourd'hui, les progrès en informatique, la disponibilité des outils et des données sous leur forme numérique, rendent envisageables certaines réformes dans l'enseignement de plusieurs types de documents géographiques sans, pour autant, délaisser ni la réflexion théorique, ni l'approche critique. Concrètement, nous souhaitons promouvoir un glissement progressif des enseignements de la photographie aérienne, de la carte topographique ainsi que des principaux types de cartographie thématique, vers leur forme numérique. Outre les facilités pratiques évidentes (mesures diverses, interprétation à l'écran) et l'enseignement et l'introduction plus précoces des techniques indispensables à leur exploitation (géoréférencement, correction géométrique, .. ;), l'approche numérique facilite l'association de ces documents à une thématique donnée.
S'y ajoute, à notre avis, la nécessité de repenser et de consolider l'enseignement des statistiques en géographie. Actuellement, la statistique descriptive est introduite dans le cursus au second semestre, une introduction à la statistique multivariée est optionnelle en cinquième semestre. Nous pensons qu'une maîtrise élémentaire des principaux traitements statistiques dans notre discipline est aussi indispensable au géographe qu'une connaissance solide des concepts fondateurs de la discipline.

- Au niveau Master

Une réforme du niveau Master 1 (semestres 7 et 8), dans l'optique du système LMD et qui sera mis en place à l'UTM à la rentrée 2005, est en cours d'application.

Concernant le Master 2 (semestres 9 et 10), la formation géomatique SIGMA (Science de l'Information Géoréférencée pour la Maîtrise de l'environnement et l'Aménagement des territoires), relativement récente (accueil de la première promotion à la rentrée universitaire 2000) fait l'objet d'ajustements et de réorientations continus. Dans l'avenir proche, il est prévu de faire évoluer ses contenus pédagogiques vers une meilleure prise en compte des possibilités de la cartographie interactive (*webmapping*), de l'aide à la décision et des techniques de modélisation.

Dans la filière des enseignements, d'abord techniques, puis géomatiques, le Département de Géographie et Aménagement de l'UTM ne propose, actuellement, pas de formation géomatique spécifique au niveau Master 2 à orientation recherche –, une lacune sans doute préjudiciable à l'accueil de doctorants à l'interface géomatique et géographie de l'environnement que nous comptons développer également au niveau de l'accompagnement des recherches doctorales.

En guise de conclusion

Peut-on conclure ? A ce stade d'avancement des recherches, les interrogations soulevées en introduction n'appellent pas forcément une réponse définitive. Tout au plus, notre implication dans les recherches géographiques, centrées, pour l'essentiel, sur la modélisation et la simulation prospective de dynamiques environnementales, et recourant à des procédures géomatiques, nous autorise à tirer des enseignements, provisoires, et à exprimer, à ce sujet, notre conviction profonde. Ainsi, nous avons acquis le sentiment que le débat, porté par certains dans la communauté géographique, et visant à mettre en doute l'utilité conceptuelle de la géomatique ou lui prêtant même des intentions hégémoniques, n'est pas nécessairement fondé. Un regard sur l'abondance et la qualité de la littérature géographique récente en matière de géomatique fondamentale et appliquée constitue une réponse à elle seule, corroborée par la réorientation géomatique que l'on observe dans nombre de formations à la recherche ou par la multiplication de périodiques géomatiques de haut niveau. A notre avis, c'est le caractère généraliste de la géomatique et son fort degré de parenté avec la géographie qui suscite de réactions et craintes, parfois vives. A cet égard, il est intéressant d'observer que le recours massif à des méthodes de recherches qui ne sont pas moins « étrangères » à la géographie, en recherches paléo-environnementales, par exemple, ne provoque pas un débat équivalent au sein de la discipline.

La géographie – carrefour de sciences, méta-science, synthèse spatiale et sociale de disciplines pointues – n'a-t-elle pas toujours su intégrer, se stimuler et avancer grâce à des innovations scientifiques venant, en partie, d'ailleurs ?

Nous voyons dans le recours aux approches géomatiques et dans la participation à leur développement et à leur perfectionnement une utilité incontestable et un champ scientifique aux contours, certes, encore flous, mais très prometteur.

A titre personnel, cette double culture, si c'en est une, géographie de l'environnement – géomatique ne pose aucun problème épistémologique. En définitive, ce sont les résultats qui comptent. En matière de modélisation et de simulation prospective de dynamiques environnementales, ces derniers sont, certes, partiels et provisoires, mais dotés d'un potentiel scientifique laissant entrevoir de nombreuses pistes de recherche prometteuses. L'interdisciplinarité, souvent invoquée et à maintes reprises restée lettre morte – la géomatique comme la géographie l'incarnent par essence.

Enfin, il nous semble probable que les avancées scientifiques dans le domaine considéré se fondent sur un va-et-vient entre théorisation et conceptualisation géographique et innovations informatiques au sens large du terme.

Bibliographie

Abler R.F., 1988: Awards, Rewards, and Excellence: Keeping Geography Alive and Well. The Professional Geographer, 40; p.135-140

Agha G., Rajendra P., 1992: An Actor-Based Framework for Heterogeneous Computing Systems. Workshop on Heterogeneous Processing, IEEE Computer Societ; p 35-42

Alonzo W., 1964: Location and land use: toward a general theory of land rent. Cambridge M.A., Havard University Press

Alonso W., 1968: Predicting Best with Imperfect Data. Journal of the American Institute for Planning, 34; p. 248-255

Ancrenaz K., 2003: Mise en place d'une base de données sur les plantes aquatiques invasives sur le territoire français. Rapport de projet. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 48 p.

Arnaud P., 1997: Modèle de prédétermination des crues basé sur la simulation stochastique des pluies horaires. Thèse de Doctorat. Université Montpellier 2.

Ayral P.-A., 2000: Le SIG « Outil » pour la gestion des risques naturels: Crues torrentielles, inondations et chutes de blocs à Lez et Saint-Béat (Pyrénées, Haute-Garonne). Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 211 p.

Bailly A., Ferras R., 1997: Eléments d'épistémologie de la géographie. Paris, Colin; 191 p.

Balzter H., 2000: Markov chain modelling for vegetation dynamics. Ecological Modelling, 126 (2-3); p. 139-154

Barnay F., 2002: Réorientation et restructuration du SIG de l'accord RAMOGE. Rapport de stage. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail, 2 tomes; 59 et 55 p.

Batty M., Longley P., 1994: Fractal Cities: A Geometry of Form and Function. Academic Press; 394 p.

Batty M., Xie Y., 1997: Possible Urban Automata. Environment and Planning B: Planning & Design, 24(2); p. 175-192

Batty M., Xie Y., 1999: Modelling Urban Dynamics through GIS-based Cellular Automata. Computers, Environment and Urban Systems, 23 (3); p. 205-233.

Beal M., Demuth H., 1998: Neural Network Toolbox User's Guide. Version 3, The Mathworks Inc.

Beltrami M.A., 1996: Evolution d'un milieu montagnard méditerranéen par système d'information géographique – Les Garrotxes (Pyrénées Orientales). Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 87 p.

Bensoussan A., 1995: Les SIG et le droit. Paris, Hermès; 250 p.

Berre Le M., Brocard M., 1997: Modélisation et espace. In : Espaces, Territoires et Sociétés. Les recherches françaises en perspective. Colloque de la section 39 du Comité National de la Recherche Scientifique 3 novembre. Paris, CNRS; p. 23-30

Berry B.J.L., 1964: Approaches to regional analysis: a synthesis. Annals of Association of American Geographers, 54; p. 2-11

Berry B.J.L., Baker A.M., 1968: Geographic Sampling. In: Berry B.J.L., Marble D. (coord.): Spatial Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs; p.91-100

Bishop C.M., 1995: Neural Networks for pattern recognition. New York, Oxford University Press; 482 p.

Blanc N., 2001: Dynamique d'évolution du mode d'occupation des sols à travers les données cadastrales dans les Pyrénées Orientales entre 1820 et 1998. Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 104 p.

Blomac F. de, Gal R., Hubert M., 1994: ARC / INFO: Concepts et applications en géomatique. Paris, Hermès; 248 p.

Bosque Sendra J., 1992: Sistemas de Información Geográfica. Madrid, RIALP; 450 p.

Bouchon-Meunier B., 1995: La logique floue et ses applications. Paris, Addison-Wesley; 257 p.
Bousquet F., Bakam I., Proton H., Page Le C., 1998: Cormas: Common Pool Resources and Multi-Agent Systems. Notes de lecture, Artificial Intelligence.
Bousquet F., Page Le C., 2001: Systèmes multi-agents et écosystèmes. In: Briot J.P., Demazeau Y. (coord.): Principes et architectures des systèmes multi-agents. Paris, Hermès Science Publications; p. 235-266
Bousquet F., Barreteau O., Aquino De P., Etienne M., Boissau S., Aubert S., Le Page C., Babin D., Castella J.-C., 2003: Multi-agent systems and role games: Collective learning processes for ecosystem management. In: Janssen M. (coord.): Complexity and ecosystem management: The theory and practice of multi-agent approaches. Edward Elgar Publishers
Bouzeghoub M., Gardain G., Valduriez P., 2000: Les objets. Paris, Eyrolles; 450 p.
Briot J.P., Demazeau Y., 2001: Principes et architecture des sytèmes multi-agents (Traité IC2, Informatique et systèmes d'information). Hermès Lavoisier; 268 p.
Brunet R., 1979: Systèmes et approche systémique en géographie. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 465; p. 406-407
Bunge W., 1962: Theoretical geography. Land studies in Geography. Series C, General and Mathematic Geography, 1
Burel F., Baudry J., 1999: Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Paris ; Editions TEC&DOC; 359 p.
Burks A.W., 1970: Essays on Cellular Automata. University of Illinois Press; 375 p.
Burrough P.A., 1986: Principles of Geographical Information Systems for Land Ressources Assessment. Monographs on soil and ressources survey, n° 12, Oxford, Oxford University Press; 193 p.
Camacho Olmedo M.T., Paegelow M., 1994: Dynamique des milieux montagnards d'Europe du sud - approche par système d'information géographique. Application aux Garrotxes (Pyrénées Orientales, France) et à la vallée du Poqueira (Sierra Nevada, Espagne). in: "Environnement et qualité de vie en Europe Centrale". Conférence de l'Union Géographique Internationale. Prague, 13 p.
Camacho Olmedo M.T., Paegelow M., 1995: Teledeteccion y Sistemas de Informacion Geografica en Geografia: guia de trabajo para la elaboracion de una base de datos espacial. Cuadernos Geograficos de la Universidad de Granada, 22-23; p. 151-173
Camacho Olmedo M.T., Menor Toribio J., Jiménez Olivencia Y., 1996: El abandono agrícola del valle del Poqueira: Sistemas de Información Geográfica y cartografía dinámica de los usos del suelo. Sierra Nevada. In: Conservación y Desarrollo Sostenible, Granada, Universidad de Granada, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía; p. 331-344
Camacho Olmedo M.T., Menor Toribio J., 1997: Posibilidades de análisis y caracterización temporal y espacial mediante un Sistema de Información Geográfica en formato vectorial. Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada, 27; p. 197-217
Camacho Olmedo M.T., Paegelow M., 1997: Utilización de un Sistema de Información Geográfica en formato ráster para el análisis espacio-temporal. I Reunión de usuarios IDRISI. Universidad de Alcalá de Henares. Communication orale
Camacho Olmedo M.T., García Martínez P., Jiménez Olivencia Y., Menor Toribio J., Paniza Cabrera A., 2002: Dinámica evolutiva del paisaje vegetal de la Alta Alpujarra granadina en la segunda mitad del siglo XX. Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada,32; p. 25-42
Camacho Olmedo M.T., García Martínez P., Jiménez Olivencia Y., Menor Toribio J., Paniza Cabrera A., 2002a: La transformación de un paisaje de montaña: el proceso de abandono de la agricultura en la Alta Alpujarra granadina. In: Los espacios rurales entre el hoy y el mañana. XI Coloquio de Geografía Rural. AGE. Universidad de Cantabria; p. 547-559

Camacho Olmedo M.T., García Martínez P., Jiménez Olivencia Y., Menor Toribio J., Paniza Cabrera A., 2002b: La Alta Alpujarra granadina en la segunda mitad del siglo XX a través de la cartografía evolutiva de su paisaje: Dinámica vegetal y repoblación forestal. In: Los espacios rurales entre el hoy y el mañana. XI Coloquio de Geografía Rural. AGE. Universidad de Cantabria; p. 535-547

Camacho Olmedo M.T., 2003: Cambios en el paisaje de la Alta Alpujarra granadina: determinación de los ritmos temporales y principales dinámicas con ayuda de un Sistema de Información Geográfica. In: Geografías para una sociedad global: diversidad, identidad y exclusión social. AGE. Universidad Autónoma de Barcelona; CD-ROM

Camacho Olmedo M.T., Paegelow M., Tulet J.C., 2004: Evolution récente du vignoble andalou. SOE; à paraître.

Carton C, Cherel O, Madec P., 2003: Mise en place d'une borne interactive pour l'UFR SES de l'UTM. Rapport de projet. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 63 p.

Carver S.J., 1991: Integrating Multi-Criteria Evaluation with Geographic Information Systems. International Journal of Geographic Information Systems, 5 (3); p. 321-339.

Census, 1970: Census Use Study: General Description, Report No. 1, US Bureau of the Census

CGER, 1997: The future of Spatial Data and Society. Commission on Geosciences, Environment and Resources - National Research Council, National Academic Press; Washington

Chaouche K., 2001: Approche multifractale de la modélisation stochastique en hydrologie. Thèse de Doctorat. ENGREF, Paris; 131 p.

Cheylan J.P., Lardon S., Mathian H., Sanders L., 1994: Les problématiques de l'espace et le temps dans les sig. Revue de Géomatique, 4 (3-4); p. 287-305

Chorley R. (coord.), 1967: Models in Geography. Londres, Methuen; 816 p.

Chrisman N., 1988: The risks of software innovation: a case study of the Harvard Lab. The American Cartographer, 15 (3); p. 291-300.

Christaller W., 1933: Die zentralern Orte in Süddeutschland. Jena, Gustav Fischer

Claramunt C., 1994: Sémantique et logique spatio-temporelles. Revue Internationale de Géomatique, 4; p. 165-180

Clarke K.C., 1990: Analytical and computer cartography. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall; 290 p.

Claval, Paul, 1998: Histoire de la géographie française de 1870 à nos jours. Paris, Nathan ; 127 p.

Clément O., Prouzet P., 1996: Contribuer à gérer les poisons migrateurs: un enjeu de recherche pour les hydrobiologistes. INRA Prod. Anim. Hors Série; p. 141-144

Cohen M., Alexandre F., Friedberg C., Lardon S., Mathieu N., Osty P.L., 1997: Les temporalités dans l'environnement: une opportunité de dialogue interdisciplinaire. In: Les temps de l'environnement. Les Journées du PIREVS Toulouse 5-7 nov. 1997; p 59-69

Comas D., Ruiz E., 1993: Fundamentos de los Sistemas de Informacíon Geográfica. Barcelone, Ariel Geografía; 295 p.

Commission des Communautés Européennes, 1988: Proposition de Directive du Conseil concernant la protection des eaux douces, côtières et marines contre la pollution par les nitrates à partir de sources diffuses. Bruxelles, CEE

Cooke D.F., 1997: Topology to TIGER: the Census Contribution. In: Foresman T.W. (coord.): The history of Geographic Information Systems: Perspectives from the pioneers. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall PTR; 397 p.

Coppock J.T., Rhind D.W., 1991: The History of GIS. In: Maguire D.J. Goodchild M.F., Rhind D.W. (coord.) Geographical Information Systems: Principles and Applications, vol. 1; p. 21-43

Coquillard P., Hill D.R.C., 1997: Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Paris, Masson; 273 p.
Cornez L., 2003: Evolution de végétations: modélisation et applications. Rapport de stage. GEODE UMR 5602 CNRS, Université Toulouse – Le Mirail; 37 p.
Couibaly P., Anctil F., Bobée B., 1999: Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels: état de l'art. Revue canadienne de génie civil, 26 (3); p. 293-304
Cowen D.J., 1988: GIS versus CAD versus DBMS: What are the differences? In: Photogrammetric Engineering and remote sensing, vol. 54, 11; p. 1551-1555
Culloch Mc W., Pitts W, 1943: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5; p. 115-133
Dale P.F., 1991: Land Information Systems. In: Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind D.W. (coord.), 1991: GIS: Principles and Applications, Londres, Longman Scientific and Technical, vol. 2; p. 85-99
Dangermond J., 1993: A classification of software components commonly used in geographic information systems. In: Peuquet D.J & Marble D.F. (coord.): Introductory readings in geographic information systems. New York, Taylor & Francis; 371 p.
Dangermond J., Smith L.K., 1988: Geographic information systems and the revolution in cartography: The nature of the role played by a commercial organization. The American Cartographer, 15 (3); p. 301.
Dauphiné A., 1995: Chaos, fractales et dynamiques en géographie. Montpellier, Reclus; 135 p.
Davalo E., Naim P., 1969: Des réseaux de neurones. Paris, Eyrolles; 232 p.
Decau J, Pujol B., 1987: Les nitrates en basse Ariège. Projets d'étude et premiers résultats. INRA; Toulouse
Denègre J., Salgé F., 1996: Les systèmes d'information géographiques. Paris, PUF. Que sais-je ? N° 3122; 127 p.
Dial R.B., 1964: Street Address Coding System. Seattle: Urban Data Center, University of Washington, Research Report n° 1
Diamont J.T., Wright J.R., 1989: Efficient Land Allocation. Journal of Urban Planning and Development, 115 (2); p. 81-96.
Didier M., 1990: Utilité et valeur de l'information géographique. Paris, Economica; 255 p.
DoE, (Department of the Environment), 1987: Handling Geographic Information. Report of the Comittee of enquiry chaired by Lord Chorley. Her Majesty's Stationary Office. Londres
Dos Santos G., 2002: Conception et mise en œuvre d'un SIG *Natura 2000* pour l'association Landes Nature. Rapport de stage. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 65 p.
Dos Santos G., François P., Frat J., 2002: Caractérisation des dynamiques d'occupation du sol dans les communes de montagne des Pyrénées Orientales. Rapport de projet. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 54 p.
Doukhan G., 2003: Modélisation des sols et dynamiques végétales: le géosystème en évolution. Le cas des Garrotxes, Pyrénées Orientales. Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 131 p.
Dragicevic,S.,Marceau D.J., 2000: A fuzzy logic approach for modeling time in GIS. International Journal of Geographic Information Science, 14 (3); p. 225-245.
Dubé P., Fortin M.J., Canham C., Marceau D.J., 2001: Quantifying global gap dynamics and spatio-temporal structures in spatially explicit models of temperate forest ecosystems. Ecological Modelling, 142 (1-2); p. 39-60.
Dubus N., Guigo M., Lebard L., 1997: Mise au point d'outils d'aide à la décision dans un environnement de resolution de problèmes, la gestion des déchets ménagers. Revue de Géographie Alpine, 2; 15 p.
Dumolard P., 1999: Accessibilité et diffusion spatiale. L'Espace Géographique, 3; p. 205-214

Eastman J.R., 1996: Uncertainty and Decision Risk in Multi-Criteria Evaluation. Implementation for GIS Software Design. In: UN University International Institute for Software Technology Expert Group. Workshop on Software Technology for Agenda '21. Decision Support Systems; 26 février-8 mars
Eastman J.R., Jiang H., 1996: Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation. In: Second International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in natural Resources and Environmental Studies. Colorado, 21-23 mai; p. 527-534
Eastman J.R., 2003: Idrisi Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, Clarklabs; 328 p.
Egenhofer M.J., Golledge R.G., 1994: Time in geographic space: Report of the specialist meeting of research initiative 10. Technical report 94-9. NCGIA
Elmozino H., Lobry C., 1997: Automates cellulaires et modélisation de la dynamique forestière. Ecologie, 28 (4); p. 307-324
Etienne P., 1994: La dynamique récente des milieux de la vallée du Biros (Ariège). Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 63 p.
Favre N., 2004: L'évolution du risque d'inondation dans la vallée de l'Hers Mort. Maîtrise de géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 163 p.
Fayolle G., 1999: Réalisation d'un Plan d'Aménagement Forestier contre les Incendies par SIG dans le massif du Cabardès Oriental (Aude). Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 203 p.
Fayolle G., 2001: Les SIG au service de l'édition cartographique, du géomarketing et de l'environnement. Rapport de stage. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 41 p.
Feenberg A., 1995: Subversive Rationalization: Technology, Power, and Democracy. In: Feenberg A., Hannay A. (coord.): Technology and the Politics of Knowledge. Bloomington, Indiana University Press; p. 3-22
Ferber J., 1995: Les systèmes multi-agents - vers une intelligence collective. Paris, InterEditions; 522 p.
Ferrand N., 1997: Modèles multi-agents pour l'aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire. Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble; 305 p.
Ferraty F., Paegelow M., Sarda P., 2005: Polychotomous regression: application to land cover prediction. In: Hardle W. (coord) Statistical case studies, Springer Verlag; à paraître
Flamm R.O., Turner M.G., 1994: Alternative model formulations for stochastic simulation of landscape change. Landscape Ecology, 9(1); p. 37-44
Forrester J.W., 1961: Industrial dynamics. Cambridge, Massachusetts, MIT Press; 464 p.
Forrester J.W., 1969: Urban dynamics. Cambridge, Massachusetts, MIT Press; 285 p.
Forrester J.W., 1971: World dynamics. Cambridge, Massachusetts, Wright-Allen Press; 142p.
Fournier N., 2004: Existe-t-il des races de pin sylvestre ? La Forêt, 6; p. 23-26
Franc A., Sanders L., 1998: Modèles et systèmes multi-agents en écologie et en géographie: état de l'art et comparaison avec les approches classiques. In Ferrand N. (coord.): Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires, Clermont-Ferrand ; SMAGET
Fränzle O., Kuhnt G., Zölitz R., 1987: Auswahl der Hauptforschungsräume für das Ökosystemforschungsprogramm der Bundesrepublik Deutschland. Forschungsbericht 10104043/02 I Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Kiel, Geographisches Institut der Universität Kiel
Fränzle O., Kuhnt G., 1999: Fundamentals of the Selection of Representative Eurosoils. In: Gawlik B.M., Muntau H. (coord.): Eurosoils II – Laboratory Reference Materials for Soil-related Studies. Joint Research Centre, European Commission: Special Publication, Ispra/Italy; p. 13-22

Frihida A., Marceau D.J., Thériault M., 2002: Spatio-temporal object-oriented data model for disaggregate travel behaviour. Transactions in GIS, 6 (3); p. 277-294
Frolova M., 2000: Le paysage des géographes russes. L'évolution du regard géographique entre le XIXè et le XXè siècle. Cybergéo, 143; 16 p.
Frost and Sullivan, 1995: Geographical Information System (GIS) markets to triple worldwide, near $4 billion. Mountain View, California; Frost and Sullivan, communiqué de presse du 16 février 1995
Gadal S., 1998: Détection automatisée et tracé de frontière: cognitique, décision, influence des données. Géopoint 98; p. 106-110
Gadal S., 2000: Evénement spatial. Ecole doctorale Structures et dynamiques spatiales, Université d'Avignon, 3; p. 193-199
Gadal S., 2003: La question des liens multi-niveaux en géographie: expérience pratique en analyse de données spatiales. Séminaire du GDR 2340 SIGMA – « Multi-Echelles », Université d'Avignon, 26 mai
Galtié J.F., Trabaud L., 1997: Les spatio-temporalités de l'évènement FEU, références à l'émergence d'une prédiction dynamique du risque d'incendie en région méditerranéenne. In: Les Temps de l'Environnement. Journées PIREVS, Toulouse. CNRS; p. 473-480
García Martínez P., 1999: La transformación del paisaje y la economía rural en la Alta Alpujarra Occidental. Thèse de Doctorat, Editorial de la Universidad de Granada; 563 p.
Gardner M., 1970: The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game 'Life'. Scientific American, vol. 23, 4; p. 120-123
Gardner M., 1971: On cellular automata, self(reproduction, the Garden of Eden and the game of the life. Scientific American, 224; p. 112-117
Gautier B., 2002: La cartographie et l'Internet. Création d'un site Internet à partir des cartes réalisées dans les maîtrises de géographie (spécialité environnement) de 1995 à 2001. Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 174 p.
Gaviano, S., 2004: Orthorectification de quatre missions aériennes et photo-interprétation on-screen appliquées aux Garrotxes (66). Rapport de stage. GEODE UMR 5602 CNRS; 9p.
Gély-Deschamps I., 1993: Le dépérissement de la châtaigneraie audoise. Analyse spatiale d'un complexe épidémiologique et contribution à la lutte contre l'Endothia parasitica dans le massif de Cuxac-Cabardés-Caudebronde. Thèse de Doctorat. Université Toulouse – Le Mirail; 243 p.
Gomes-Zotano, J., 2004: Cartographie de la couverture forestière sur orthophotoplans. Le cas des Garrotxes (66). Rapport de stage. GEODE UMR 5602 CNRS; approx. 25 p.
Goodchild M.F., Mark D.M., 1993: GIS, geography and the NCGIA. The Professional Geographer, 45; p. 216-219
Goodchild M.F., 1988: A spatial analytical perspective on GIS. International Journal of Geographic Information Systems, 1; p. 327-334
Gordon J., Shortliffe E.H., 1985: A Method for Managing Evidential Reasoning in a Hierarchical Hypothesis Space. Artificial Intelligence, 26; p. 323-357.
Goreaud F., 2000: Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes. Thèse de doctorat, ENGREF; 524 p.
Grasdepot G., 2003: Mise en place d'un SIG 'Client' appliqué au domaine des circulations douces. Rapport de stage. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 85 p.
Gregory D., 1994: Geographical Imaginations. Oxford, Blackwell; 442 p.
Grosbois O., 1995: Analyse géomorphologique et pédologique du nouveau bassin-versant expérimental d'Auradé (Gers). Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 128p.
Grosbois O., 1996: Contribution à l'établissement de modèles spatiaux de distribution du sol en domaine de pays molassique. DEA de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 94 p.

Guiavarc'h L., 2002: Analyse diachronique des haies sur les communes de Nailloux et Préserville (Lauragais) de 1946 à 2002. Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 76 p.
Guimet Pereña J., 1992: Introduccíon conceptual a los Sistemas de Informacíon Geográfica (SIG). Madrid, Estudio Gráfico 139 p.
Gutiérrez Puebla J., Gould M., 1994: SIG: Sistemas de Información Geográfica. Madrid, Editorial Sintesis; 251 p.
Hägerstrand T., 1952: The propagation of innovation waves. Land Studies in Geography, Series B, Human Geography, n° 4; p. 3-19
Haggett P., 1972: Geography: a modern synthesis. Harper & Row; 483 p.
Harg Mc I., 1969: Design with Nature. Garden City, New York, Natural History Press; 198 p.
Harris C.D., Ullman E.L., 1945: The nature of American cities. Annals of the American Academy of Political and Social Sciences, 242; p. 7-17
Harris T., Weiner D., 1996: GIS and Society: The Social Implications of How People, Space, and Environment are represented in GIS. Santa Barbara, California: NCGIA Technical Report 96-7
Hebb D., 1949: The Organization of Behavior, New York, Wiley; 335 p.
Hel Le P., 2000: Evaluation socio-économique d'un territoire à l'aide d'un SIG: des clés de lecture pour des hypothèses de développement dans le cadre d'une reconversion industrielle au service d'une dynamique locale territorialisée. Bassin de Decazeville-Capdenac Gare (Aveyron). Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 189 p.
Hewlett Packard, 1993: Spatial data processing with computer systems. Hewlett Packard
Hill D.R.C., 1993: Analyse orientée objet et modélisation par simulation. Addison-Wesley
Hill D.R.C., Coquillard P., Guénot J., Pastre J., 1994: Design of an ecosystem modelling environment. Application to forest growth simulation. In: Proceedings of the first Joint Simulation Societies Conference CISS, Zurich 21-25 août 1994; p. 538-544
Hornik K., 1991: Approximation capabilities of multilayer feedfoward networks. Neural Networks, 4 (2); p. 251-257.
Hornik K., 1993: Some new results on neural network approximation. Neural Networks, 6 (8); p. 1069-1072
Hosmer D., Lemeshow S., 1989: Applied Logistic Regression. NewYork, Wiley; 307 p.
Houet T., 2002: Modélisation du changement d'échelles en télédétection par réseau de neurones: applications à l'évolution de l'occupation hivernales des sols en Bretagne. Mémoire de DEA de Géographie, Université Rennes 2 (COSTEL-ENSTB); 115 p.
Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. (coord.), 2001: Climate Change 2001. The scientific basis: contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press ; 881 p.
Hoyt H., 1939: The structure and growth of residential neighbourhoods in American cities. Federal Housing Administration
Hugot A., 2000: Modélisation des écoulements gravitaires catastrophiques par une approche objet dynamique: Erosion – Transport. Thèse de Doctorat. Université Paris VI; 395 p.
Huston M.A., Angelis De D.L., 1994: Competition and coexistence: the effects of ressources transport and supply rates. The American Naturalist, 144 (6); p. 954-977
Jacewicz P., 2002: Modélisation et simulation distribuées par automates cellulaires. Application en écologie. Thèse de Doctorat. Université de Perpignan; 147 p.
James W., 1890: Association. In: Psychology (Briefer Course). New York, Holt; p. 253-279
Jen E., 1990: A periodicity in One-dimensional Cellular Automata. Physica D, 45; p. 3-18
Jeune Le M., Prats S., 2003: Constitution d'un SIG pilote pour le vignoble de Madiran (Gers). Rapport de projet. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 53 p.

Kansky K.J., 1963: Structure of transport networks: relationships between network geometry and regional characteristics. University of Chicago, Department of Geography, Research Papers, n° 84
Kooperberg C., Bose S., Stone J., 1997: Polychotomous Régression. Journal of American Statistics Association, 92; p 117-127.
Lafage B., 2001: Les SIG: la cartographie à la carte. Rapport de stage. DESS SIGMA, Université Toulouse – Le Mirail; 33 p
Lai T.L., Wong S., 2001: Stochastic Neural Networks with Applications to Nonlinear Time Series. Journal of the American Statistical Association, 96 (455); p. 968-981
Lake R.W., 1993: Planning and applied geography: Positivism, ethics, and geographic information systems. Progress in Human Geography, 17; p. 404-413
Lamiscarre F., 2003: Gestion de risques, SIG et urbanisation: Le cas de la Réunion. Maîtrise de Géographie. Université Toulouse – Le Mirail; 141 p.
Langlois A., Philipps M., 1997: Automates cellulaires. Paris, Hermès; 197 p.
Langran G., 1992: Time in geographic information systems. Taylor & Francis; 189 p.
Langran G., 1993: Issues of implementing a spatiotemporal system. International Journal of Geographical Information Systems, 7; p. 25-43
Lardon S., Cheylan J.P., Libourel T., 1997: Le temps dans les sig: dynamique des entités spatio-temporelles. In: Les temps de l'environnement. Les Journées du PIREVS Toulouse 5-7 novembre; p. 147-152
Laurini R., Thompson D., 1992: Fundamentals of spatial information systems. San Diego, Academic Press; 640 p.
Laurini R., Milleret-Raffort F., 1993: Les bases de données en géomatique. Paris, Hermès; 340 p.
Lee N.S., Grize Y.L., Dehnad K., 1987: Quantitative Models for Reasoning under Uncertainty in Knowledge-Based Expert Systems. International Journal of Intelligent Systems, II; p. 15-38
Lee R. S.T., 2004: Fuzzy-Neuro Approach to Agent Applications. From the AI Perspective to Modern Ontology. Heidelberg, Springer-Verlag; approx. 350 p.
Leslie P.H., 1945: On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrica, 33; p. 183-212
Levoyer R., Fall P., 2004: Etude de la dynamique spatio-temporelle du vignoble de Cahors à Albas et Luzech. Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; approx. 175 p.
Lippe E., Smidt De J.T., Glenn-Lewin D.C., 1985: Markov models and succession: a test from a heathland in the Netherlands. Journal of Ecology, 73; p. 775-791
Logofet D., Lesnaya E., 2000: The mathematics of Markov models: what Markov chains can really predict in forest succession. Ecological Modelling, 125, (2-3); p. 258-298
Longley P., Clarke G. (coord.), 1995: GIS for Business and Service Planning. Cambridge GeoInformation International; 316 p.
Loreau M., Naeem S., Inchausti P. (coord.), 2002: Biodiversity and ecosystem functioning: synthesis and perspectives. Oxford, Oxford University Press; 294 p.
Lösch A., 1939: Die räumliche Ordnung der Wirtschaft. Jena
Lotka A.J., 1924: Elements of physical biology. Baltimore, Williams & Wilkins; 460 p.
Mabire D., 1995: Evaluation du potentiel de Spot 5 pour la mise à jour des réseaux de la base de données cartographiques de l'IGN. Rapport de stage. Université de Toulouse – Le Mirail; 19 p.
Macmillan W.D., 1997: La modélisation en géographie. Vision internationale des contributions françaises. In : Espaces, Territoires et Sociétés. Les recherches françaises en perspective. Colloque de la section 39 du Comité National de la Recherche Scientifique 3 novembre. Paris, CNRS; p. 31-38
Malthus T.R., 1798: Essai sur le principe de population.

Marconis R., 2000: Introduction à la géographie. Paris, A. Colin; 233 p.
Mark D.M., Chrisman N., et al., 1997: The GIS History Project, Summary Paper presented at the UCGIS Summer Assembly, Bar Harbor, USA, June 1997
Mas J.F., 1999: Monitoring Land-cover Changes: A Comparison of Change Detection Techniques. International Journal of Remote Sensing, 20 (1); p. 139-152
Mas, J.F., 2004: Mapping land use/cover in a tropical coastal area using satellite sensor data, GIS and artificial neural networks. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 59(2); p. 219-230
Mas, J.F., Puig H., Palacio J.L., Sosa A.A., 2004: Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. Environmental Modelling and Software, 19(5); p. 461-471
Matheron G., 1962: Traité de Géostatistique appliqué. Paris, Editions Technip; 333 p.
Maystre L.Y., Pictet J., Simos J., 1994: Méthodes multicritères ELECTRE. Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; 323 p.
Meadows H.D, Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., 1972: The limits to growth. New York, Universe Books; 205 p.
Métailié J.P., Paegelow M., 2000: La dynamique du pin à crochets (Pinus uncinata Ram.) dans l'est des Pyrénées Françaises: le retour de la forêt en montagne pastorale et métallurgique. Ed. Casa de Velasquez; 10 p.
Métailié J.P., Paegelow M., 2004: Land Abandonment and the Spreading of the Forest in the Eastern French Pyrenees in the Nineteenth to Twentieth Centuries. In: Mazzoleni S., Pasquale di G., Mulligan M., Martino di P., Rego F. (coord.): Recent Dynamics of the Mediterranean Vegetation and Landscape. Wiley; p. 219-236
Métailié J.P., Selleron G., Effantin R., Carozza J.M., Galop D., 2002: La fin de la forêt au Petén ? Continuités et ruptures au cours des deux derniers millénaires dans les basses terres mayas (Nord-Ouest du Petén, Guatemala). In: Actes de colloque international de Besançon, 18-22 septembre. Presses Universitaires Franc-Comtoises. Collection Annales Littéraires. Série Environnement, Sociétés et Archéologie, 3; p. 473-486
Metropolis N., Ulam S., 1949: The Monte Carlo method. Journal of the American Statistical Association, 44; p. 335-341
Meyer B., Jouvelot P., 2000: Conception et programmation orientées objet. Paris, Eyrolles; 1223 p.
Mezzadri-Centeno T., 1998: La modélisation et la projection spatio-temporelle dans les SIG. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier; 140 p.
Michelin Y., 1995: Les jardins du Vulcain: paysages d'hier, d'aujourd'hui et de demain dans la chaîne des puys du Massif central français. Paris, Editions de la MSH; 155 p.
Miller R., 1995: Beyond method, beyond ethics: Integrating social theory into GIS and GIS into social theory. Cartography and Geographic Information Systems 22(1); p. 98-103
Minsky M.L., 1965: Matter, minds and models. International Federation of Information Processing Congress, vol 1; p. 45-49
Minsky M.L., 1987: Society and mind. New York, Simon and Schuster; 339 p.
Moles C., 1994: Systèmes d'information géographique appliqué à l'étude de la dynamique paysagère d'un espace montagnard méditerranéen à l'abandon: le haut Conflent (Pyrénées Orientales). DEA de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 74 p.
Mouël Le S., 2001: Etude d'un milieu montagnard méditerranéen par un SIG: la vallée des Garrotxes. Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 102 p.
Mouël Le S., 2002: Mise en service du SIG du schéma directeur d'entretien des berges de la Garonne. Rapport de stage. DESS SIGMA, Université de Toulouse – Le Mirail; 67 p.
NCGIA, 1990: Core curriculum. 3 volumes: 1. Introduction to GIS; 2. Technical issues in GIS; 3. Application issues in GIS. Santa Barbara, National Center for Geographic Information and Analysis, University of California
Neef E. (coord.), 1966: Das Gesicht der Erde. Frankfurt, Thun; 627 p.

Neumann Von J., 1963: The general and Logical Theoru of Automata. In: Taub A.H. (coord.): Collected work 5.
Neumann Von J., 1966: Theory of Self-Reproducing Automata. University of Illinois Press
Nystuen J.D., 1963: Identification of some fundamental concepts. In: Berry, B.J.L., Marble D. (coord.): Spatial Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs; p.35-41
O'Hare G.M.P., Jennings N.R. (coord.), 1996: Foundations of Distributed Artificial Intelligence. New-York, Wiley; 576 p.
Odum, E.P., 1971: Fundamentals of Ecology. Philadelphia, Saunders Company; 574 p.
Odum H.T., 1957: Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida. Ecological Monographs, 22; p. 55-212
Openshaw S., 1991: A view on the GIS crisis in geography, or using GIS to put Humpty Dumpty back together again. Environment and Planning A, 23; p. 621-628
Paegelow M., 1987: Ecologie et télédétection montagnardes pastorales, un exemple: les pâturages d'Archilondo. Mémoire de maîtrise. Université de Toulouse – Le Mirail; 160 p.
Paegelow M., 1988: Le rôle de l'organisation géomorpho-pédologique du sous-bassin 5 d'Auradé (Gers) dans la dynamique de l'azote minéral. Contribution à une gestion raisonnée de l'azote en système de cultures intensives. DEA de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail, 2 tomes; 124 p. et 13 p.
Paegelow M., Hubschman J., Decroux J., Puginier M., 1990: Des mesures simples d'aménagement rural contre la pollution par les nitrates. L'exemple d'Auradé (Gers, France). in: International Symposium " Nitrates, Eau, Agriculture". Paris; 6 p. + poster
Paegelow M., 1991a: Système d'information géographique et gestion de l'environnement. Application à l'étude des sols et de la pollution par les nitrates d'origine agricole en bassin-versant expérimental. Thèse de doctorat nouveau régime. Université de Toulouse – Le Mirail; 327 p.
Paegelow M., 1991b: Surveillance et contrôle de la pollution nitrique agricole en Terrefort aquitain. RGPSO, 62 (1); 7 p.
Paegelow M., Hubschman J., 1991: Des mesures simples contre la pollution par les nitrates: le rôle protecteur d'un complexe prairie-haie en culture intensive dans les coteaux du Sud-Ouest. Perspectives Agricoles, 155; 6 p.
Paegelow M., 1992: Nitratbelastung landwirtschaftlichen Ursprungs im "Terrefort" des aquitanischen Beckens. In: "Beiträge zur Geoökologie aus Forschung, Praxis und Lehre". Kieler Geographische Schriften, 85; 9 p.
Paegelow M., 1993: Système d'information Géographique et gestion de l'environnement. L'exemple d'une base de données multisource et multitemporelle: Marsac-sur-Tarn (81, France). Fête de la Science. Toulouse; 2 posters
Paegelow M., 1994: Système d'information géographique et gestion de l'environnement: application à la pollution nitrique d'origine agricole. L'exemple du bassin versant d'Auradé - 32, France. SITEF. Toulouse; 2 posters
Paegelow M., Gély-Deschamps I., 1994: Gestion de l'environnement et système d'information géographique. Application au chancre du châtaignier dans le massif de Cuxac-Cabardès-Caudebronde sur le versant sud de la Montagne Noire (Aude). Géopoint 94. Avignon; 5 p.
Paegelow M., Prohon P., 1994: Cartima. Logiciel cartographique et SIG raster. Dépôt APP n° 94-24-011-00
Paegelow M., 1995: Système d'information géographique et dynamique des milieux montagnards méditerranéens. Aplication aux Garrotxes (Pyrénées Orientales, France). Bulletin du Comité Français de Cartographie, 146-147; p.186-190
Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., 1997: Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol en milieu montagnard méditerranéen. Etude comparative des Garrotxes (Pyrénées

Orientales, France) et du Poqueira (Sierra Nevada, Espagne). In: Les temps de l'environnement. Les Journées du PIREVS Toulouse 5-7 novembre; p. 535-542
Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Menor Toribio J., 2000: Límites y aportaciones de los Sistemos de Información Geográfica para trazar la dinámica espacio-temporal del paisaje en áreas montañosas mediterráneas. IX Congreso de Metodos Quantitativos, Sistemas de Informacion Geografica y Teledeteccion. Asociación de Geógrafos Españoles. Universidad de Alcalá de Henares; 15 p.
Paegelow M., 2002: Les SIG dans l'enseignement et la recherche en géographie – témoignage de l'Université Toulouse 2. 1er Forum Géomatique de Gaillac. 03/12/02. Communication orale.
Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Menor Toribio J., 2002: Modelizacion prospectiva del paisaje mediante Sistemas de Informacion Geografica. In: X Congreso de Metodos Quantitativos, Sistemas de Informacion Geografica y Teledeteccion. Asociación de Geógrafos Españoles.17-20 septembre, Valladolid; 10 p.
Paegelow M., 2003a: SIG – gestion de l'environnement et développement durable. Exemples de réalisations, nouvelles tendances dans le domaine de l'aide à la décision. Journées d'études: Pratiques respectueuses de l'environnement et développement durable. Coopération Interrégionale et décentralisée: Midi-Pyrénées – Coujavie-Pomméranie. Toulouse 26-27 mars 2003. Communication orale + CD-ROM
Paegelow M., 2003b: Prospective modelling with GIS of land cover in Mediterranean mountain regions. In: 6th AGILE Conference on GIScience. 24-26 avril 2003, Lyon; p. 519-529
Paegelow M., 2003c: Modélisation prospective de l'occupation du sol par SIG en milieu montagnard méditerranéen. In: Journée d'étude du réseau Maison des Sciences de l'Homme et de la Société « Anthropisation et histoire de l'environnement dans les montagnes du sud de l'Europe ». Toulouse, 26 juin 2003; communication orale
Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., 2003: Le processus d'abandon des cultures et la dynamique de reconquête végétale en milieu montagnard méditerranéen: L'exemple des Garrotxes (P.O., France) et de la Alta Alpujarra Granadina (Sierra Nevada, Espagne). In: Sud Ouest Européen n° 16; p. 113-130
Paegelow M. Villaneix N., 2003: Dynamiques et modélisations de l'occupation du sol appliqués aux anthroposystèmes montagnards méditerranéens. Rencontres entre Mathématiques appliquées et Sciences de l'Homme. Toulouse 8 avril; communication orale
Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., 2004: Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). In: International Journal of Geographical Information Science; soumis
Paegelow M, Ferraty F. Ferré L, Sarda P, Villaneix N., 2004: Etude comparée de méthodes non supervisées (SIG) et automatiques (modèle paramétrique et réseaux neuronaux) appliquées à la modélisation prédictive de l'occupation du sol en milieu montagnard méditerranéen – l'exemple des Garrotxes (66). Cybergéo ; soumis
Paegelow M., Vidal F. (coord.), 2004: La géographie d'aujourd'hui: méthodes et techniques. Initiation aux techniques de traitement et de représentation de l'information géographique: informatique , cartographie, CCAO, photo-interprétation et télédétection. Presses Universitaires du Mirail, Collection Amphi 7; 12 p. + CD-Rom
Paque D., 2004: Gestion de l'historicité et méthodes de mise à jour dans les SIG. Cybergéo, n° 278; 6 p.
Park R. E., Burgess E.W., McKenzie R.D., 1925: The city. University of Chicago Press.
Parlitz U., Merkwirth C., 2000: Nonlinear prediction of spatio-temporal time series. ESANN'2000 Proceedings, Bruges; p. 317-322

Pech P, 2001: A qui appartient la montagne de Lure ? (Alpes de Haute-Provence). Géographie d'une perception. Géographie et cultures, 37; p. 81-95
Pech P., Simon L., Tabeaud M., 1995: Définition conceptuelle d'une montagne en milieu méditerranéen: l'exemple de la montagne de Lure. Montagnes Méditerranéennes, 2; p. 53-58
Pech P., Simon L., Tabeaud M., 1997: Temporalités sociales et temporalités naturelles en montagne de Lure. In: Les temps de l'environnement. Toulouse, Journées du PEVS-PIREVS; p. 183-192
Pech P., Simon L., Tabeaud M., 2000: Evolution of a channel over 41 years (1956 – 1997) and effect of heavy rainfall (1994) in the Jabron basin, south-east France. Studia geomorphologica carpatho-balcanica, 37; p. 47-65
Pech R., Tulet J.C., 2002: Mutations spatiales de la vigne en Midi-Pyrénées, depuis le début du XIX° siècle. Sud-Ouest Européen, 14; p. 37-50
Peuquet D.J., Marble, D. (coord.), 1990: Introductory Readings in Geographical Information Systems. Londres, Taylor & Francis; 371 p.
Pickles J., 1991: Geography, GIS, and the surveillant society. Papers and Proceedings of the Applied Geography Conference 14; p. 80-91
Pickles J., 1993: Discourse on method and the history of discipline: reflections on Jerome Dobson's 1993 'Automated geography'. The Professional Geographer, 45; p. 451-455.
Pickles J. (coord.), 1995: Ground Truth: The Social Implications of Geographic Information Systems. New York, Guilford Press; 248 p.
Poix C., 1998: Logiciel MAGE: simulateur pour l'étude de l'évolution de l'occupation du sol; période XV^{è} XVV^{è} siècle. ENTIAC
Pornon H., 1990: Systèmes d'information géographique. Des concepts aux réalisations. Paris, STU; 108 p.
Portugali J., Benenson I., 1994: Competing order parameters in a self-organizing city. Abhandlungen Anthropogeographie, Institut für Geographische Wissenschaft.
Prats S., 2003: L'édition cartographique. Rapport de stage. DESS SIGMA, Université de Toulouse – Le Mirail; 29 p.
Pumain D., Sanders L., Saint-Julien T., 1989: Villes et autoorganisation. Paris,Economica; 191 p.
Pumain D., Saint-Julien T., 1997: Analyse spatiale, Localisations dans l'espace. Paris, Colin, collection CURSUS; 195 p.
Pumain D., Robic M.C., 2002: Le rôle des mathématiques dans une « révolution » théorique et quantitative: la géographie française depuis les années 1970. Revue d'histoire des sciences humaines, 6; p. 123-144
Rajendra P., Kim W., Agha G., 1996: Parallel Implementations of Irregular Problems Using High-level Actor Language. 10th International Parallel Processing Symposium, Honolulu, HI, IEEE Computer Society; p 857-862
Rhind D., 1988: Personality as a factor in the development of a discipline: The example of computer-assisted cartography. The American Cartographer, 15 (3); p. 277-289
Ribeyreix-Claret C., 2001: Agriculture et environnement en Gascogne gersoise. Erosion du sol et pollution diffuse par le phosphore. Le cas du bassin versant d'Auradé (Gers). Thèse de Doctorat. Université de Toulouse – Le Mirail; 455 p.
Ritter C., 1833: Über das historische Element in der geographischen Wissenschaft. Abhandlungen der Königlichen Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Historisch-philologische Klasse; p. 41-68
Robic M.C. (coord.), 2001: Géographes en pratiques (1870-1945) - le terrain, le livre, la cité. Rennes, PUR, coll. "espace et territoires"
Robin M., 1992: La télédétection. Nathan; 318 p.

Rollot N., 2003: Risque d'inondation et occupation du sol dans le Lauragais. Etude diachronique du BV de la Marcaissonne 1954 – 1998. Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 136 p.
Rosenblatt F., 1958: The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review, 65; p. 386-408
Rouet P., 1991: Les données dans les systèmes d'information géographiques. Paris, Hermès; 278 p.
Rougerie G., Beroutchachvili N., 1991: Géosystème et paysages. Bilan et Méthodes. Paris, A.Colin; 302 p.
Roussel E., 2004: L'évolution morphologique des réseaux hydrographiques en presqu'île de Brøgger, Spitsberg. Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 185 p.
Roy B., 1985: Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Paris, Economica; 423 p.
Ruas A., 1999a: Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie. Thèse de Doctorat. Université de Marne La Vallée; 323 p.
Ruas A. (coord.), 2002: Généralisation et représentation multiple. Hermès science; 390 p.
Ruis A., 1996: Les évolutions paysagères des territoires de village de la commune de Castillon-de-Larboust (Pyrénées Cenrales). Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 62 p.
Saaty T.L., 1977: A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. J. Math. Psychology, 15; p. 234-281
Saint-Joan D., 1996: Un système expert flou pour l'étude de la dynamique paysagère. In: Nouvelles tendances en modélisation pour l'environnement. Actes des Journées PIREN CNRS; p. 151-156
Salessy J., 1987: Le point sur la teneur en nitrates des eaux potables distribuées dans le Bassin Adour-Garonne. Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales Midi-Pyrénées; Toulouse
Sanders L. (coord.), 2001: Les modèles en analyse spatiale. Traité IGAT, Paris, Hermès-Lavoisier; 329 p.
Sauer C., 1956: The education of a geographer. Annals of the Association of American Geographers, Presidential Adress
Savall M., Pécuchet J.P., Chaignaud N.,Itmi, M., 2001: YAMAM – un modèle 'organisation pour les systèmes multi-agents. Implémentation dans la plate-forme Phœnix. 3ème Conférence Francophone MOSIM (Modélisation et simulation), 25-27 août, Troyes, France
Schärlig A., 1990: Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide à la décision multicritère. Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; 304 p.
Schneider F., 1996: Evolution de l'utilisation du territoire de Sost. Approche SIG. Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 76 p.
Scholten H.J., LoCascio, A., 1997: GIS Application research: History, trends and developments. In: GISDATA Final Conference – Geographic Information Research at the Millenium. Le Bischenberg, France, 13-17 septembre
Schuurman N., 2000: Trouble in the heartland: GIS and its critics in the 1990s. Progress in Human Geography, 24 (4); p. 569-590
Schwal B., 1999: Evolution en 110 ans de la biodiversité végétale sur la commune de Nailloux (Lauragais): relations avec l'occupation du sol et les pratiques agricoles. DEA de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 90 p.
SCS (Society for Computer Simulation), 1979: Technical Comitee on Model Credibility, Terminology for Model Credibility. Simulation, 32 (3); p. 103-107
Selleron G., 1995: De Landsat MSS à Spot: 14 années de deforestation continue sur un front pionnier vénézuélien. Revue Photo-interprétation et Télédétection, 130; 9p.

Selleron G., Mezzadri-Centeno M.T., 2002: Télédétection et logique floue: diagnostic et prospections temporelles de la déforestation sur un front pionnier tropical. Soc. Française de Photogrammétrie et Télédétection, 167; p. 4-15
Sheppard E., 1993: Automated geography: what kind of geography for what kind of society? The Professional Geographer, 45; p. 457-460
Simon L., 1997a: Climax et dynamiques végétales en Méditerranée nord occidentale. In: Tabeaud M., Pech P., Simon L. (coord.):Géo-Méditer., Paris, Publications de la Sorbonne; p.175-184
Simon L., 1997b: La montagne de Lure: des paysages « plus ou moins méditerranéens ». Etudes Vauclusiennes, 58; p.21-23
Simon L, 1999: Potentialités forestières et production de bois: de l'approche naturaliste à l'approche géographique. Annales de Géographie, 609-610; p. 635-647
Simon L., Pech P., Tabeaud M., 1996: Giono et la montagne de Lure: perceptions, mythe ou réalité ? In: Corvol A., Arnould P., Hotyat M. (coord.): La forêt. Perceptions et représentations. Groupe d'Histoire des Forêts Françaises, Paris, l'Harmattan; p. 79-92
Simon L., Pech P., Tabeaud M., 2000: Landscape types and geoecology dynamics of a mediterranean mountain. The southern Alps case study. Landscape Ecology; p. 261-274
Simon L. et Tamru B., 1998: Cartographie biogéographique et dynamiques de paysage en montagne de Lure. Mappemonde, 49; p.26-31
Simon L., Arnould P., Marty P., 1999: Forêts, paysages, environnement: deux siècles de mise en valeur et de reconquête forestière en France. 1800-2000. 9ème Cogresso de Historia Agraria, Bilbao, 15-17 septembre. Departamento de Historiae e Insitutiones economicas. UPV/EHU; p. 557-574
Smith C.C., 1967: The New Haven Census Use Study - A General Description, Proceedings of the Fifth Annual URISA Conference; p.276-285
Smith N., 1992: History and philosophy of geography. Real wars, theory wars. Progress in Human Geography, 16(2); p.257-271
Sotchava V.P., 1967: La science structuro-dynamique du paysage et problèmes géographiques de l'avenir. In: Rapports de l'Institut de Géographie de Sibérie et d'Extrême-Orient, 16; p. 18-31
Spearman C., 1904: General intelligence objectively determinated and measured. American Journal of Psychology; 15, p. 201-293
Steinitz C., 1993: Geographical Information Systems: A Personal Historical Perspective, the Framework for a Recent Project, and Some Questions for the Future – série de trois articles (juin, juillet, septembre), GIS Europe
Stinchcombe M.B., 1999: Neural network approximation of continuous functionals and continuous functions on compactifications. Neural Networks, 12 (3); p. 467-477
Sui D.Z., 1994: GIS and urban studies: positivism, post-positivism, and beyond. Urban Geography, 15; p. 258-278
Tabeaud M., Bessat F., Pech P., Simon L., 2004: Les variabilités séculaires des précipitations sur la montagne de Lure (sud-est de la France). In: Congrès International de Climatologie, Tunis; p. 126-132; à paraître
Tabeaud M., Legrand A., Pech P., Simon L., 2004: La station de ski de Lure (Alpes de Haute Provence): utopie touristique ou fatalité climatique ? Espaces; à paraître
Tabeaud M., Pech P., Simon L., 2003: Weather hazards, vulnerabilities and risks in Mediterranean hinterlands from the 19th century – the Lure Mountain (France); p. 143-149. In: Fouache E. (coord.): The mediterranean world environment and history, Elsvier; 488 p.
Taylor D.R.F., 1994: Geographic Information Systems: The Microcomputer and Modern Cartography. In: Taylor D.R.F. (coord.), 1994: Geographic Information Systems: The

Microcomputer and Modern Cartography. Modern Cartography, vol.1. Oxford, Pergamon; p. 1-20
Taylor P.J., 1990: Editorial comment: GKS. Political Geography Quarterly 9(3); p. 211-212
Taylor P.J., Johnston R., 1995: GIS and geography. In: Pickles (coord.) Ground truth. New York, Guilford Press; p. 68-87
Thoen, B., 1997: The history of Geographic Information Systems: Perspectives from the pioneers. In: Foresman T.W. (coord.): Prentice Hall Professional Technical Reference; 397 p.
Tilman D., 1977: Resource competition between planktonic algae: an experimental and theoretical approach. Ecology, 58; p. 338-348
Tobler W.R., 1979: Cellular Geography. In: Gale S, Olsson G. (coord.): Philosophy in Geography.Kluwer; p. 379-386
Tomlinson R.F., 1987: Current and potential uses of geographical information systems. The North American experience. International Journal of Geographic Information Systems, vol 1, 3; p. 203-219
Tomlinson R.F., 1988: The impact of the transition from analogue to digital cartographic representation. The American Cartographer, 15 (3); p.249-261
Tong-Tong J.R., 1995: La logique floue. Hermès; 160 p.
Tosic P., Agha G., 2003: Understanding and Modeling Agent Autonomy in Dynamic Multi-Agent, Multi-Task Environments. Proc. First European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS '03), Oxford, UK, 18-19 décembre
Tosic P., Agha G., 2004a: Concurrency vs. Sequential Interleavings in 1-D Threshold Cellular Automata. Proc. IEEE - IPDPS '04 (APDCM Workshop), Santa Fe, New Mexico, USA, 26-30 avril
Tosic P., Agha G., 2004b: Towards a Hierarchical Taxonomy of Autonomous Agents. Proc. IEEE Int'l Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE-SMC'04), The Hague, Netherlands, 10-13 octobre
Tulet J.C., 2001: La création d'un nouveau vignoble d'appellation: le « Vin des Coteaux de Quercy ». Le Vidéographe, Université de Toulouse – Le Mirail ; Film de 28 min (réalisation Bastrad B.)
Tulet J .C., Sanchez Alvarez J., 2002: La croissance du vignoble du Chili par l'amélioration de la qualité et de l'exportation. Sud-Ouest Européen, 14; p. 111-120
Turing A., 1950: Computer machinery and intelligence. Mind, 49; p. 433-460
Turner B.L., Meyer W.B., 1994: Global land-use and land-cover change: an overview. In: Meyer W.L., Turner B.L.(coord.): Changes in land use and land cover: a global perspective. Cambridge; Cambridge University Press; p. 3-10
Ussel de H., 1988: Pratiques agricoles et qualité des eaux de surface. Bassin-versant d'Auradé (32). Synthèse des résultats de 1980 à 1987. CdF/AZF ; Toulouse
Verhulst P.F., 1845: Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population. Mémoires de l'Académie Royale Belge, 18; p. 1-38
Vezon M., 1999: Risques et contraintes à l'aménagement d'une station balnéaire: exemple de Port la Nouvelle (Aude). Maîtrise de Géographie. Université de Toulouse – Le Mirail; 69 p.
Vidal F., 1996: Modèles d'évolution de surfaces forestières par analyse morpho-mathématique de photographies aériennes. In: Nouvelles tendances en modélisation pour l'environnement. Actes des Journées PIREN CNRS; p. 197-201
Vidal F., Saint-Joan D., 1997: Une interface système expert flou / morphologie mathématique sur images numériques pour l'étude des évolutions spatio-temporelles de milieux naturels: le cas des massifs forestiers de la soulane de Tabe en Ariège. In: Les temps de l'environnement. Les Journées du PIREVS Toulouse 5-7 novembre; p. 565-572

Villaneix N., Paegelow M., Cornez L., Ferraty F., Ferré L., Sarda P., 2004: Various approaches for predicting land cover in Mediterranean mountains. Journal of Applied Statistics; soumis
Voiron C., 1995: Analyse spatiale et analyse d'images. Reclus, coll. Espaces modes d'emploi; 190 p.
Voltera V., 1928: Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together. In: Chapman (coord.), 1931: Animal Ecology. New York, McGraw-Hill; 464 p.
Warntz W., 1983: Trajectories and Co-ordinates. In: Bilingue M., Gregory D., Martin R. (coord.): Recollections of a Revolution: Geography as Spatial Science. New York, St. Martin's Press; 235 p.
Webber M.J., 1984: Explanation, prediction and planning: the Lowry model. Londres, Pion; 214 p.
White R., Engelen G., 1997: Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional planning. Environment and Planning B: Planning & Design, 24(2); p. 235-246
Widrow B., Hoff M., 1960: Adaptive switching circuits. 1960 IRE WESCON Convention Record, New York, IRE; p. 96-104
Wolfram S., 1985: Some recent Results and Questions about Cellular Automata. In: Demongeot J., Solès E., Tchuente M. (coord.): Dynamic Systems and Cellular Automata. Londres, Academic Press; 399 p.
Worboys M.F., Duckham M., 2004: GIS: A Computing Perspective. Taylor and Francis; 448 p.
Wright D.J., Goodchild M.F., Proctor J.D., 1997: Demystifying the Persistent Ambiguity of GIS as "Tool" Versus "Science". Annals of the Association of American Geographers, 87 (2); p. 346-362
Wu J., Marceau D.J., 2002: Modelling complex ecological systems: An introduction. Ecological Modelling, 153 (1-2); p. 1-6
Xie Y., 1996: A General Model for Cellular Urban Dynamics. Geographical Analysis, 28 (4); p. 350-373
Yager R.R., 1988: On Ordered Weighted Averaging aggregation operators in multicriteria decision making. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics., 8(1); p.183-190
Yeh A.G., Li X., 2001: A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS. Environment and Planning B, 28; p.733-753
Zadeh L.A., 1965: Fuzzy sets. Inf. Control, 8; p. 338-353
Zadeh L.A., 1978: Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems 1; p. 3-28
Zeigler B.P., 1976: Theory of Modeling and Simulation. New York, Wiley; 435 p.

Références en ligne

ansme.com, 2004: Géomatique. http://dir.ansme.com/world/317996.html
Barcet H, Buosi J., Corre Le S., Jegou L., Paegelow M., Vidal F., 2002: Cours interactif d'initiation aux technologies en géographie. In: Site Web du SED, Université de Toulouse – Le Mirail. http://www.univ-tlse2.fr/sed/geographie/accueil.html
Bousquet F., Gautier D., 1999: Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents: Les approches « Spatiale » et « Acteurs ». Cybergeo, 89, 13 avril; 12 p. http://www.cybergeo.presse.fr/

Bousquet F., 2001: Modélisation d'accompagnement. Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables. Mémoire pour l'obtention de l'habilitation à diriger les recherches. Université Lyon I; 71 p. http://cormas.cirad.fr/pdf/hdrbousquet.pdf
Callahan J., 2002: GIS at the University of Delaware. http://www.udel.edu/
Capel H., 1977: Institucionalización de la geografía y estrategias de la comunidad científica de los geógrafos. Geo Crítica, 8-9; p. 1-58. http://www.ub.es/geocrit/geo8.htm
Capel H., 1998: Una geografía para el siglo XXI. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Univesidad de Barcelona, 19, 15 de abril de 1998. http://www.ub.es/geocrit/sn-19.htm
CASA, 2000: Centre for Advanced Spatial Analysis. University College London. http://www.casa.ucl.ac.uk/gistimeline/
CASSINI SIGMA (Système d'Information Géographique – Méthodes et Applications) GDR 1041 CNRS, 2004: Thèmes de recherche. Thème 2. http://cassini.univ-lr.fr/Pages/theme2.htm
Census, 1994: Bibliographie de l'USBC concernant TIGER.
http://www.census.gov:80/geo/www.tiger/bibl.asc
CIRAD, 2001: Procédures de diagnostic et de suivi environnemental dans les zones d'accueil de réfugiées. http://guinee-hcr.cirad.fr/projet.htm#
Clarke, K.C., 2000: Page personnelle de Keith C. Clarke. Department of Geography, University of California, Santa Barbara. http://www.geog.ucsb.edu/
Clarklabs, 2004: Bibliography, by Subject.
http://www.clarklabs.org/BibliographyBySubject.htm
Coddington P., 1996: Monte Carlo Simulation for Statistical Physics. Site NorthEast Parallel Architectures Center, l'Université de Syracuse.
http://www.npac.syr.edu/users/paulc/lectures/montecarlo/p_montecarlo.html
Connuau T., 2002: Site personnel. http://tcosnuau.free.fr/COURS/MERISE/MERISE.HTM
Convis C., 1996: The Nature of GIS. In: ESRI Conversation Programme WebSite.
http://www.conservationgis.org/gishistory/gishistry2.html
Couliaby P., Anctil F., Bobée B., 1999: Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels: état de l'art. Revue canadienne de génie civil, 26 (3); p. 293-304
http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cgi-bin/rp/rp2_abst_f?cjce_l98-069_26_ns_nf_cjce
Crochepeyre C., 1996: Les bases de données relationnelles. Comment ça marche ?
http://www.commentcamarche.net/relation/relintro.php3
Cunningham G., 2002: Social and Philosophical Critiques of Geographical Information Systems. Geography 516. Graduate GIS Seminar. Department of Geography. University of British Columbia. http://www.geog.ubc.ca/courses/geog516/notes/social.html
Dao H., 2002: Systèmes d'Information Géographique (cours n° 4662). Année universitaire 2002-2003. Semestre d'hiver. Notes de cours. Université de Genève, Département de Géographie. http://www.geo.unige.ch/cours/sig/
Dufour J.M., 1998: Techniques de séries chronologiques. Introduction. Cours en ligne. Site de l'Université de Montréal. Faculté des Arts et des Arts et des Sciences.
http://www.fas.umontreal.ca/SCECO/dufour/ResE/Dufour_1998_C_TS_IntroductionTS_F.pdf
DESS SIGMA (Science de l'Information Géoréférencée pour la Maîtrise de l'environnement et l'Aménagement des territoires), 2004: Page d'accueil.
http://www.univ-tlse2.fr/geo/formation/form_pro/frameset_dess_sigma.htm
DESS SIGMA – site des étudiants, 2004: Page d'accueil.
http://sigma.ensat.fr/WebEtudiants/index.htm
Education Nationale, 2004: Campus numérique.
http://www.educnet.education.fr/superieur/campus.htm

EIAJ/GHU (Ecole d'ingénieurs de l'arc Jurassien), 2004: Logique floue et processeur « flou ». Site de l'EIAJ.
http://www.eiaj.ch/v2/support_de_cours/electricite/Cours_GEL/Branches_techniques/Electronique_analogique/Cours%20PDF/Fuzzy.PDF
Engelen G., 2003: References Cellular Automata – LUCMOD (land use change modelling). Site du LUCC (Land Use and Land Cover Change) International Project Office, Louvain-La-Neuve, Belgique.
http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/MODLUC_Course/Presentations/Guy_engelen/CA-References.doc
Ferrand N., 2002: Modélisation et systèmes multi-agents. CEMAGREF, LISC.
http://wwwlisc.clermont.cemagref.fr/Labo/activite_recherche/projets/Projets_en_cours/MultiAgents/pressma.htm
Gadal S., Jeansoulin R., 2000: Borders, frontiers and limits: some computational concepts beyond words. Cybergeo, 125; 17p.
http://www.cybergeo.presse.fr/ehgo/gadal/borders.htm
Gadrat P., 2004: La logique floue. Site personnel. http://fleche.org/pierre/logfloue/
Génie Civil et Habitat de l'Académie de Paris, 2003: Géomatique – présentation.
http://genie-civil.scola.ac-paris.fr/delarue/Geomatique/geomatique.htm
Gerhard-Mercator-Universität, 2002: Tutorium Humangeographie 2. Walter Christaller: Theorie der zentralen Orte. http://www.supplement.de/geographie/humgeo2/index.htm
GISCA (National Centre for Social Applications of GIS), 2004: History of Geographic Information Systems. University of Adelaide, South Australia.
http://www.gisca.adelaide.edu.au/~bbryan/lectures/foo/
gisdevelopment, 2004: GIS development. Portail SIG US-américain.
http://www.gisdevelopment.net/history/
Goreaud F, 2004: Modélisation des systèmes biologiques. Quelques modèles théoriques en écologie. Cours en ligne. Site du LISC (Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes) – CEMAGREF, Lyon.
http://wwwlisc.clermont.cemagref.fr/Animation/Enseignement/Goreaud_F/Goreaud_SIAD04_cours2.pdf
GRID, 2004: United Nations Environment Programme - Global Ressource Information Data Base. http://www.grid.unep.ch
Hêche J.F., 2001: Chaînes de Markov à temps discret. Site de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). http://roso.epfl.ch/cours/ro/2003-2004/applets/dtmca.html
Hypergéo, 2004: Géomatique. Encyclopédie électronique.
http://193.55.107.45/hpt/geomatique.htm
IGBP, 2004: International Geosphere-Biosphere Programme.
http://www.igbp.kva.se/cgi-bin/php/frameset.php
IGN, 2004: SIG.
http://seig.ensg.ign.fr/fichlexi.php3?NOCONT=CONT4&ID=1&IDENT=mot&RPHP=&RCO=&RCH=&RF=&RPF=&RPC
INRS (Institut national de la recherche scientifique), 2000: Modélisation hydrologique en bassin versant. Université du Québec.
http://www.inrs-eau.uquebec.ca/cequeau/index.html
Ladet S., Deconchat M., Monteil C. Lacombe J.P. Balent G., 2004: Les chaînes de Markov spatialisées comme outils de simulation: usages, avantages et limites. In: Conférence CASSINI-SIGMA – Géomatique et analyse spatiale. Grenoble, 2-4 juin.
http://www-lsr.imag.fr/Cassini04/Cassini2004/vendredi/Presentation-Cassini2004-Ladet-04-06-2004.ppt

Lara De M., Caseay R., Van Le A., 2004: Allocation optimale de ressources en écologie: croître ou se reproduire ? Les Questions. Scilab. Site de l'ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
http://cermics.enpc.fr/scilab_new/site/Tp/Optimisation_dynamique/Plante_alloc_Q/Plante_alloc_Q.html
Lebel T. et al., 2001: Variabilité climatique et variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest. Un système couplé. In: Atelier sur le Couplage des modèles atmosphériques et hydrologiques. Toulouse 3-5 déc. 2001. Site du LTHE (Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et Environnement).
http://www.lthe.hmg.inpg.fr/OHM-CV/Documents/actesAMA01/ama2001_Lebel.pdf
LGPP (Laboratoire de gestion et procédés de production), 2002: MOSIP (Modélisation et simulation de Systèmes de Production). Cours en ligne. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne. http://lgppwww.epfl.ch/pdf/coursMOSISP/MOSISP-Chap4.pdf
Libourel T., 2003: Autour de la conception de systèmes complexes. Modélisation, Evolution, Infrastructures. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université Montpellier II; 74 p. http://www.lirmm.fr/~libourel/RECH/memoire.pdf
LUCC, 2004: Land Use and Land Cover Change. http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/lucc.html
Marchand B., 1998: SimUrb. Site du CERMA UMR CNRS 1563
http://www.cerma.archi.fr/inventur/inventur021.html
Metropolis N., 1957: The beginning of the Monte Carlo method. Site de S. Jackman, Université de Stanford. http://jackman.stanford.edu/mcmc/metropolis1.pdf
Messina, P., 2004: What on Earth is a Geographic Information System ? Department of Geology, San José State University. http://geosun.sjsu.edu/paula/285/gis/sld005.htm
Microplan, 2004: Système d'Information Géographique.
http://www.microplan.fr/sig_definition.htm
Moisselin J.M., 2002: Les précipitations en France au cours du XX^{ème} siècle. Site du CNRS: La recherche française sur le climat: variabilité climatique.
http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/biblio/pigb13/06_precipitations.htm
Nunes C., Augé J.I. (coord.), 1999: IGBP Report n° 48 and IHDP Report n° 10. Land-Use and Land-Cover Change (LUCC). Implementation Strategy.
http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/lucc.html
Paegelow M., 2001: Cours et exercices SIG. SIG et télédétection. Cours en ligne. Site du SED de l'Université de Toulouse – Le Mirail. http://www.univ-tlse2.fr/sed
Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Menor Toribio J., 2003: Modelizacion prospectiva del paisaje mediante Sistemas de Informacion Geografica. GEOFOCUS, 3; p. 22-44 http://geofocus.rediris.es
Parker D.C., Berger T., Manson S.M. (coord.), 2001: LUCC Report Series N° 6: Agent-Based Models of Land-Use and Land Cover Change (ABM/LUCC). Report and Review of an International Workshop. Irvine, Califonia, USA,4-7 octobre; 140 p.
http://www.indiana.edu/~act/focus1/ABM_Report6.pdf
Poix C., Michelin Y., 2000: Simulation paysagère: un modèle multi-agents pour prendre en compte les relations sociales. Cybergeo, 116; 11 p.
http://www.cybergeo.presse.fr/
Préfecture de l'Aude, 2003: Feu de forêt. http://www.aude.pref.gouv.fr/ddrm/risque-feu/ff3.html
RAMOGE, 2004: RAMOGE. http://www.ramoge.org/
RNCREQ (Réseau National des Conseils Régionaux de l'Environnement du Québec), 2003: Outils de diagnostic et aide à la décision. http://www.rncreq.org/dd/outils_diague.html
Robic M.C, Pumain D., 2003: Géographie et esprit des lois (historique). Cybergéo.
http://193.55.107.45/hpt/histloi.htm

Roman J., 2004: Algorithmique parallèle et simulation haute performance appliquées à la dynamique de populations de parasites. Rapport scientifique 2000-2003 du Pôle M3PEC (modélisation microscopique et mésoscopique en physique, dans l'environnement et en chimie). Site DRIMM (Direction des Ressources Informatique et Multimédia Mutualisées) ; Université Bordeaux 1. http://www.m3pec.u-bordeaux1.fr/roman2.pdf
Ruas A., 1999b: Modèle de généralisation de données urbaines à base de contraintes et d'autonomie. Cybergéo, 107; 14 p. http://www.cybergeo.presse.fr/
Sanders L., 1997: Durability of settlement systems: a long terme perspective. In: 10th Colloquium of Theoretical and Quanitative Geography, Rostock.
http://www.univ-tours.fr/isa/pages/bibliographie.html
Sanders L., 1999: Modelling within a self-organising or a microsimulation framework: opposite or complementary approaches? , Cybergeo, 90; 5 p. http://www.cybergeo.presse.fr/
SDG (Swarm Development Group), 2004: Swarm.
http://wiki.swarm.org/wiki/Swarm_Development_Group_(SDG)
Sénat, 2003: Projet de loi relatif à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages. http://www.senat.fr/rap/l02-154/l02-1540.html
sigfrance.org, 2003: Définitions du SIG. http://sigfrance.free.fr/dossiers/defs.htm
tout-savoir, 2003: Définition géomatique. Encyclopédie électronique.
http://www.tout-savoir.net/lexique.php?rub=definition&code=3191
Touzet C., 1992: Les réseaux de neurones artificiels. Introduction au connexionnisme. Site du CESAR (Center of Engineering Science Advanced Research)
http://saturn.epm.ornl.gov/~touzetc/Book/Bouquin.htm#1.1
Tucker B.C., Arnand M., 2004: The Application of Markov Models in Recovery and restoration. International Journal of Ecological Environmental Sciences, 30; p. 131-140
http://laurentian.ca/biology/MANAND/pdf/TuckerAnand04.pdf
UNEP, 2004: United Nations Environment Programme. http://www.unep.org
Université d'Avignon, 2004: DESS "Géomatique et conduite de projets de développement".
http://www.univ-avignon.fr/presentat/DESSgeomat.html
Université de Laval, 2003: Qu'est-ce que la géomatique ?
http://www.scg.ulaval.ca/fr/recrutement/definition.asp
Université du Maine, 2004: Physique et simulations numériques: Le jeu de la vie. Site de la Faculté des Sciences exactes et naturelles.
http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/divers/conway.html
Villemin G., 2003: Intelligence Artificielle. Site personnel.
http://membres.lycos.fr/villemingerard/Logique/IAalgor.htm
Volle M., 2004: A propos de la modélisation. Site personnel.
http://www.volle.com/travaux/modelisation2.htm
Wisconsin State Cartographer's Office, 2001: GIS History.
http://www.geography.wisc.edu/sco/gis/history.html
WWW Virtual Library, 2004: Random Numbers and Monte Carlo Methods.
http://random.mat.sbg.ac.at/links/monte.html
Zeigler B.P., Sarjoughian H.S., 2000: Creating distributed simulation using DEVS M&S environments. In: Joines J.A. et al (coord.): Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference; p. 158-160. http://www.informs-cs.org/wsc00papers/012.PDF

Table des figures

Fig. 1 : Des origines des SIG. *Source : Messina, 2004* 23
Fig. 2 : Carte de cas de choléra en 1854 à Londres établie par John Snow. *Source : Messina, 2004* 24
Fig. 3: Méthode de superposition de cartes d'Ian Mc Harg. *Source : Mc Harg, 1969 (cité par Clarke, 2000)* 24
Fig. 4 : La centralité spécifique de biens et services. *Source : Gerhard-Mercator-Universität, Duisburg, 2002* 25
Fig. 5 : Fondements historiques des SIG. *Source : Convis, 1997* 26
Fig. 6 : Chronologie schématique des SIG. *Inspirée de Comas et Ruis, 1993 ; modifiée* 28
Fig. 7 : Evolution et maturation des SIG. *Source : Callahan, 2002* 30
Fig. 8 : Exemple de la structure DIME 33
Fig. 9 : Exemples de requêtes spatiales élémentaires 44
Fig. 10 : Exemples de requêtes faisant appel à la topologie spatiale 44
Fig. 11 : Exemples d'analyse horizontale 47
Fig. 12 : Principe d'une carte de ruissellement surfacique 48
Fig. 13 : Principe de la détection de pseudo-objets en mode image 49
Fig. 14 : Passage d'une carte d'occupation du sol (Garrotxes, Pyrénées Orientales) à une carte de pseudo-objets 49
Fig. 15 : Illustration graphique des opérateurs logiques par diagrammes de Venn 50
Fig. 16 : Exemples d'application raster de l'algèbre logique : croisements entre plans thématiques (en haut) et croisements entre plans temporels (en bas) 50
Fig. 17 : Exemple de combinaison entre opérateurs logiques et d'évaluation 51
Fig. 18 : Intersection et union de plans raster compressés par la méthode de quadrants 51
Fig. 19 : Principe d'une surface de friction pour établir une carte d'accessibilité. 52
Fig. 20 : Carte d'accessibilité aux routes (pondérées) et aux villages dans les Garrotxes (Pyrénées Orientales) 53
Fig. 21 : Requête attributaire basée sur deux opérateurs d'évaluation chaînés par un opérateur logique (intersection assortie de deux restrictions) 55
Fig. 22 : Exemple d'une cartographie et d'un histogramme fréquentiel produits par SICA. *Source : Paegelow, 1991a* 61
Fig. 23 : Exemple d'un croisement entre deux plans d'information assorti d'un masque géométrique (restriction à deux sous-bassin versants). *Source : Paegelow, 1991a* 62
Fig. 24 : Procédure de détermination des ZEHR. *Source : Paegelow, 1991a* 63
Fig. 25 : Concentrations (ppm) en N-NO3- de la couche arable (5 à 20 cm de profondeur) de la ZEHR n° 1 d'Auradé. *Source : Paegelow, 1991a* 64
Fig. 26 : Cartographies du toit de la molasse dans le ZEHR n° 2 d'Auradé, obtenues par krigeage validé au préalable par variographie. *Source : Paegelow, 1991a* 65
Fig. 27 : Vue du sous-bassin versant (SBV) 5 d'Auradé en direction du sud-est, été 1990. *Source : Paegelow et al., 1990* 66
Fig. 28 : Gros plan sur la bande enherbée à la fin du printemps 1990. *Source : Paegelow et al., 1990* 67
Fig. 29 : Carte des mesures antipolluantes proposées. *Source: Paegelow, 1991a* 68
Fig. 30 : Organigramme de Cartima. Source : Paegelow et Prohon, 1994 70
Fig. 31 : Géomorphologie du bassin versant d'Auradé élargi. *Source : Grosbois, 1995* 73
Fig. 32 : Croisement entre l'altitude et l'exposition afin de sectoriser le terrain d'études selon la vulnérabilité des châtaigneraies au champignon Endothia parasitica. *Source : Gély-Deschamps, 1993* 74

Fig. 33 : Modèle conceptuel de données (MCD) d'une base de données nationale pour la lutte contre les plantes aquatiques invasives. *Source : Ancrenaz, 2003* 75
Fig. 34 : Formulaire de saisie Access du groupe de propriétaires dans le cadre de la constitution d'un SIG Natura 2000 (directive habitat) pour le compte de l'association Landes – Nature. *Source : Dos Santos, 2002* 75
Fig. 35 : Historicité du risque à Saint-Béat : cartographie sur fond cadastral numérisé des parcelles inondées lors des crues de la Garonne de 1875 et / ou de 1897. *Source : Ayral, 2000* 76
Fig. 36 : Exemple de renseignement de la base de données SIG dans une zone exposée à des risques multiples sur l'île de la Réunion. *Source : Lamiscarre, 2003* 77
Fig. 37 : Occupation du sol en 1954 dans le bassin versant de la Marcaissonne (banlieue sud-est de Toulouse). *Source : Rollot, 2003* 78
Fig. 38 : Occupation du sol en 1998 dans le bassin versant de la Marcaissonne (banlieue sud-est de Toulouse). *Source : Rollot, 2003* 78
Fig. 39 : Carte de visibilité du terrain à partir de la vigie d'Alaric située au sud-sud-est du Cabardès Oriental (Aude). *Source : Fayolle, 1999* 79
Fig. 40 : Risque de propagation d'un incendie. PAFI du Cabardès Oriental (Aude). Source : *Fayolle, 1999* 80
Fig. 41 : Comparaison des résultats d'une analyse sociodémographique par ACP et EMC des communes de montagne des Pyrénées Orientales. *Source : Dos Santos et Frat, 2002* ... 81
Fig. 42 : Cartographie interactive sur le Web. L'exemple RAMOGE. *Source : Barnay, 2002* 82
Fig. 43 : Site Internet valorisant les productions (carto-)graphiques issues des maîtrises de géographie, spécialité environnement. *Source : Gautier, 2002* 83
Fig. 44 : Températures simulées de janvier sur la soulane des Garrotxes (66). Carte en *pseudo-pixels* 84
Fig. 45 : MCD pour la simulation climatique appliquée à la Montagne de Lure (Haute Provence). *Source : Blois et al., 2004* 85
Fig. 46 : Reboisement quasi exclusivement spontané dans les Garrotxes (66) entre 1826 et 1995 87
Fig. 47 : Etude historique de l'occupation du sol dans le département des Pyrénées Orientales à base de données cadastrales. *Source : Blanc, 2001* 88
Fig. 48 : Suivi 2002 de la zone test dite « Les Brancades », Garrotxes (66) : sur fond de photographie aérienne panchromatique de 1995, cartographie des individus arbustifs ou arborescents (espèce et taille) 89
Fig. 49 : Evolution de l'occupation du sol à Nailloux (Lauragais haut-garonnais) entre 1948, 1972 et 1993. *Source : Schwal, 1999* 90
Fig. 50 : Evolution des haies à Nailloux (Lauragais haut-garonnais) entre la fin des années 1940, le début des années 1970, 1993 et 2002 (IC – haie sur un interchamp, BR – haie en bord de route ou chemin, HAB – haie en bord de bâtiment). *Source : Guiavarc'h, 2002* 91
Fig. 51 : Progression des plaines intra-morainiques en presqu'île de Brøgger, Spitsberg, entre 1966, 1977 et 1990. *Source : Roussel, 2004* 92
Fig. 52 : Correction géométrique des photographies aériennes avec cartographie des résidus appliquées ici à la mission de 1990 (presqu'île de Brøgger, Spitsberg). *Source : Roussel, 2004* 92
Fig. 53 : Occupation du sol en 2004 dans le municipio de Quivican (30 km au sud de La Havane). Cartographie réalisée à partir de l'interprétation d'une image SPOT 5 multispectrale du 30 novembre 2002 et de recherches sur le terrain en janvier 2004. 93

Fig. 54 : Evolution de la vigne andalouse entre 1982 et 1999. *Source : Camacho Olmedo et al., 2004* 94
Fig. 55 : Intervalle temporel et résolution temporelle dans le cadre d'un espace temporel linéaire, continu et bidirectionnel (passé, présent, futur). *Selon : Mezzadri-Centano (1998) et Paque (2004), modifié* 100
Fig. 56 : Repères d'un système. *Source : Sauvant, 2003* 104
Fig. 57 : Compartimentation en sous-systèmes d'un système complexe et contrôlé opérant et régulateur : l'organisme vivant. *Source : Sauvant, 2003* 105
Fig. 58 : Les étapes de l'élaboration d'un modèle. *Source : Sauvant, 2003* 106
Fig. 59 : Les étapes de modélisation dans le cadre des bases de données relationnelles. *Source : Crochepeyre, 2002* 107
Fig. 60 : Relations entre complexité du modèle et connaissances tirées du modèle (à gauche) et entre complexité du modèle et complexité de mise en oeuvre informatique (à droite). *Source : Coquillard et Hill, 1997* 108
Fig. 61 : Exemple d'un modèle mécaniste. *Source : Sauvant, 2003* 109
Fig. 62 : Typologie de modèles. *Source : Coquillard et Hill, 1997* 110
Fig. 63 : Profil temporel : moyenne de la coupe d'apprentissage en 1975, 1987, 1989 et 1994 – réserve forestière de Ticoporo (Andes vénézuéliennes). *Source : Selleron et Mezzadri-Centano, 2002* 111
Fig. 64 : Les dix principales dynamiques observées parmi potentiellement 625 (cinq modalités d'occupation du sol à cinq dates), Garrotxes (66). *Source : Paegelow et Camacho Olmedo, 1997* 112
Fig. 65 : Principe de la « vector change analysis ». *Source : Eastman, 2003* 113
Fig. 66 : Exemple de calcul de la magnitude vectorielle entre deux dates et pour une information spatiale à deux composantes. Images SPOT 1997 et 2002 (canaux XS1 et XS3), Quivican, sud de La Havane, Cuba 113
Fig. 67 : Modèle SIG de simulation de croissance urbaine sous Idrisi Kilimanjaro 114
Fig. 68 : Modèle du flux énergétique de Silver Springs, Floride : modèle conceptuel, données expérimentales et modèle mathématique déterministe. *Source : Odum (1957) et Patten (1971), Keen et Spain (1992) ; in : Coquillard et Hill, 1997* 116
Fig. 69 : Développement d'individus d'une population avec quatre états possibles (sommets) et probabilités de transition entre états (arcs) représentées sous forme de matrice de transition (à droite). *Source : Coquillard et Hill, 1997 ; modifié* 118
Fig. 70 : Appliquette DTCMA (Discrete Time Chain Markov Analyser) 1.2. *Source : Hêche, 2001* 119
Fig. 71 : Effet spatial et conquête forestière. *Source : Hill et al., 1994* 120
Fig. 72 : Un automate cellulaire simple : le jeu de la vie. *Source : Université du Maine, 2004* 123
Fig. 73 : Processus de généralisation par simulations multi-agents en étapes.1) Résolution de la densité du bâti souhaité. 2) Déplacement des bâtiments pour satisfaire à la contrainte de proximité. 3) Suite à la résolution des conflits méso, auto-généralisation des bâtiments de l'objet îlot urbain. 4) Nouveau déplacement de l'objet suite à la dilatation. 5) Requalification de la situation. *Source : Ruas, 1999b* 127
Fig. 74 : Schéma des interactions entre agents. *Source : Poix et Michelin, 2000* 128
Fig. 75 : Couplage d'un système expert avec un SIG. *Source : CIRAD, 2001* 129
Fig. 76 : Architectures comparées d'un neurone biologique et artificiel. *Source : Touzet, 1992* 130
Fig. 77 : Perceptron ou réseau multi-couches. *Source : Touzet, 1992* 131
Fig. 78 : Théorie des sous-ensembles (fonction d'appartenance) en logique booléenne (en haut) et logique floue (en bas). *Source : Gadrat, 2004* 132

Fig. 79 : Principe de la commande floue. *Source : Gadrat, 2004* 133
Fig. 80 : Surfaces déboisées (en blanc) observées (à gauche) et prédites (à droite) en 1994, réserve forestière de Ticoporo (Andes vénézuéliennes). *Source : Selleron et Mezzadri-Centeno, 2002* 135
Fig. 81 : Espace de décision dans l'évaluation multicritère. *Source : selon Eastman, 2003* . 139
Fig. 82 : Modèle conceptuel de la simulation prospective discrète appliquée à la dynamique de l'occupation du sol 140
Fig. 83 : Filtre de contiguïté à voisinage étendu (5x5) utilisé dans l'automate cellulaire 141
Fig. 84 : Espace de décision illustrant l'effet des poids d'ordre dans l'EMC 143
Fig. 85 : Mise en œuvre du modèle de simulation prospective de l'occupation du sol appliquée aux Garrotxes (66). *Source : Paegelow, 2004* 146
Fig. 86 : Garrotxes – occupation du sol en 2000 simulée et observée 148
Fig. 87 : Alta Alpujarra Granadina – occupation du sol en 2001 simulée et observée 150
Fig. 88 : Ecart paramétrique entre états observés et simulés, Garrotxes (66). *Source : Paegelow, 2003* 151
Fig. 89 : Architecture d'un réseau neuronal à une couche cachée. *Source : Paegelow et al., 2004* 156
Fig. 90 : Exemple de voisinage. *Source : Paegelow et al., 2004* 158
Fig. 91 : Occupation du sol en 2000, Garrotxes, simulée par modèle paramétrique non linéaire (à gauche) et observée (à droite) 160
Fig. 92 : Occupation du sol en 2000, Garrotxes, simulée par réseaux neuronaux (à gauche) et observée (à droite) 161
Fig. 93 : Simulations de l'occupation du sol pour 2000 et occupation du sol observée en 2000, Garrotxes 163
Fig. 94 : Croisement des résultats des trois modèles : nombre et nom des modèles simulant correctement l'occupation du sol observée en 2000 165
Fig. 95 : Histogramme des fréquences (% des observations, 2000) des taux de prédiction par modèle et catégorie d'occupation du sol 166
Fig. 96 : Nombre de changements d'occupation du sol durant la période 1980 – 1989 – 2000 et pixels correctement prédits par les différents modèles 167

Table des tableaux

Tab. 1 : Opérateurs de la logique floue et degré de vérité (fonction d'appartenance). *Source : selon EIAJ, 2004* 133
Tab. 2 : Echelle de standardisation de l'aptitude d'un facteur d'environnement pour exprimer la probabilité d'état de la variable modélisée basée sur la significativité de l'écart entre distribution observée et distribution théorique 142
Tab. 3: Produit cartésien entre les états de la variable observée (lignes) et simulée (colonnes) pour 2000, Garrotxes. Données exprimées en pour cent de la surface totale. 148
Tab. 4 : Produit cartésien entre les états de la variable observée (lignes) et simulée (colonnes) pour 2000, Alta Alpujarra Granadina. Données exprimées en pour cent de la surface totale. 149
Tab. 5 : Pourcentage de mal prédits (résidus) de la simulation de l'occupation du sol pour 2000, Garrotxes, par modèle paramétrique non linéaire 159
Tab. 6 : Pourcentage de mal prédits (résidus) de la simulation de l'occupation du sol pour 2000, Garrotxes, par réseaux de neurones 160
Tab. 7: Surfaces (%) cumulées de chaque catégorie d'occupation du sol observées et simulées (chiffres arrondis) 162
Tab. 8: Pourcentage de résidus (mal prédits) par catégorie d'occupation du sol et par approche modélisatrice 164
Tab. 9 : Analyse des résidus (pixels incorrectement prédits) des simulations : écart en nombre de catégories entre état observé et simulé (en % de la surface totale) 164
Tab. 10 : Mise en relation des scores de prédiction correctes des trois modèles avec l'occupation du sol observée en 2000 (en % de la surface totale). RN = modèle par réseaux neuronaux ; MPL = modèle paramétrique non linéaire ; SIG = modèle SIG ... 165
Tab. 11 : Nombre de changements d'occupation du sol durant la période 1980 – 1989 – 2000 et pixels correctement prédits par les différents modèles 167