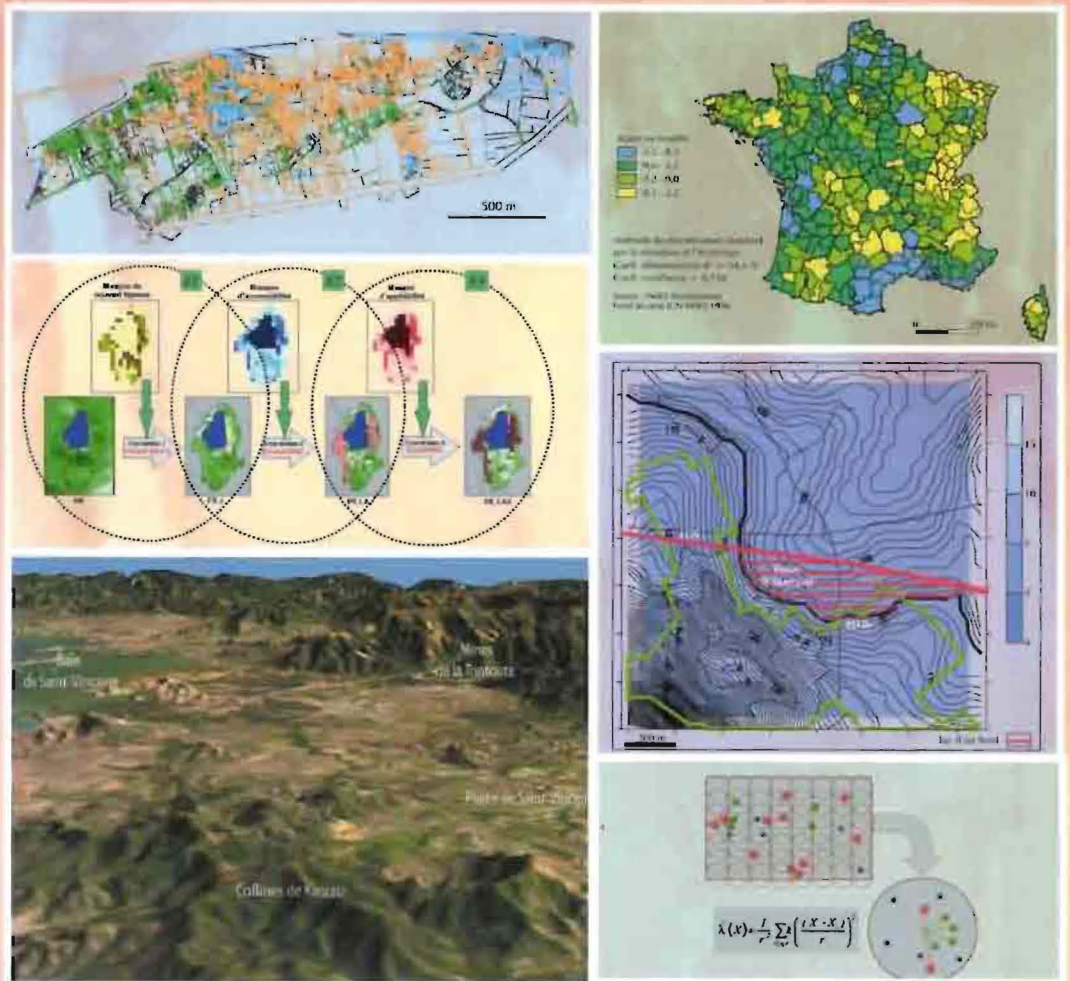


Apport des SIG à la recherche

Sous la direction de Jean-Marie Fotsing



Collection du CEDETE



PRESSES
UNIVERSITAIRES
ORLÉANS

Actes du colloque international Géomatique et applications n° 1
Orléans les 13 et 14 mars 2003

Apport des SIG à la recherche

Sous la direction de Jean-Marie Fotsing

Actes du colloque international
Géomatique et applications n° 1

Apport des Systèmes d'information géographiques
au monde de la recherche

Orléans les 13 et 14 mars 2003

Comité d'organisation

Président : Jean Marc Zaninetti, CEDETE - Université d'Orléans, Unité S140 ESPACE - IRD Orléans
Josée Bouyer, Université d'Orléans
Gilbert David, IRD Orléans
Jean-Marie Fotsing, Université d'Orléans
David Huaman, IRD Orléans
Frédéric Huynh, IRD Orléans
Joëlle Maillardet, Université d'Orléans
Joel Mirloup, Université d'Orléans
Paolo Pérera, Université d'Orléans
Isabelle Pellissier, IRD Orléans
Michel Petit, Unité S140 Espace - IRD Montpellier
Philippe Quodverte, Université d'Orléans

Comités scientifique et de lecture

Président : Jean Marie Fotsing, CEDETE - Université d'Orléans, Unité S140 ESPACE - IRD Orléans
Michel Arnaud, département Territoires, environnement et acteurs CIRAD-TERA, Montpellier
Micheline Hotyat, Université de Paris IV - Sorbone
David Huaman, Unité S140 ESPACE - IRD Orléans
Frédéric Huynh, Unité S140 ESPACE - IRD Maison de la télédétection, Montpellier
Didier Josselin, UMR ESPACE 6012 CNRS, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse
Didier Lille, Unité S140 ESPACE - IRD Nouméa, Nouvelle Calédonie
Pierre Maurel, UMR3S Cemagref - ENGREF, Maison de la Télédétection Montpellier
Joël Mirloup, Laboratoire CEDETE, Université d'Orléans,
Serge Motet, IGN, Direction recherche, IGN, Saint Mandé
Sandra Perez, Université d'Orléans, Unité S 140 ESPACE - IRD Orléans
Yveline Poncet, Unité S140 ESPACE - IRD Orléans
Héctor Fabián Reyes, Departamento de Agronomía, Universidad de La Serena, IV Región, Chile
Jean Marc Zaninetti, CEDETE - Université d'Orléans, Unité S140 ESPACE - IRD Orléans

Maquette et mise en page

Joelle Maillardet (Laboratoire CEDETE))

Illustrations de couverture

La structure du tissu urbain de Tours d'après le cadastre du XIX^e s (H. Galinié)
Résidus du modèle MCO entre chômage et taux d'activité (J.-M. Zaninetti)
Corrections des estimations de production de biomasse (N. Ganzin)
Simulation du lac d'air froid sur le site de Vriigny après l'implantation du remblai ferroviaire (S. Bridier)
Modèle paysager 3D réalisé par drapage de l'image satellite sur le MNT, région de Tontoua (P. Dumas)
La méthode des noyaux pour réaliser des séquences cartographiques animées (A. Banos)

Presses Universitaires d'Orléans
10 rue de Tours • BP 46527
45065 ORLÉANS CEDEX 2

© Presses universitaires d'Orléans
ISBN - 2 - 913454-25-9

Avant propos et remerciements

Les 13 et 14 mars 2003 s'est tenu à Orléans un colloque international organisé à l'initiative conjointe de l'unité S 140 ESPACE (Expertise et spatialisation des connaissances en environnement) de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et du CEDETE (Centre d'études sur le développement des territoires et l'environnement), laboratoire d'accueil du département de géographie de l'université d'Orléans, autour du thème général de *l'apport des Systèmes d'information géographiques au monde de la recherche*. Il avait pour objectif de donner la parole aux chercheurs et universitaires qui emploient les SIG dans divers domaines (agronomie, archéologie, cartographie, climatologie, épidémiologie, géographie, géologie, histoire, pédologie...), afin d'identifier l'apport de ces outils de gestion à la recherche scientifique.

Ce colloque a réuni une centaine de participants scientifiques et professionnels venus d'Europe (Belgique, Hollande, France, Luxembourg, Suisse), d'Afrique (Algérie, Cameroun, Kenya, Tunisie), d'Amérique du Sud (Brésil, Chili, Pérou) et d'Océanie (Australie, Nouvelle Calédonie) qui ont abordé les caractéristiques des SIG et leurs contributions aux travaux de recherche dans des champs disciplinaires variés.

Les vingt communications orales présentées, sélectionnées parmi la cinquantaine de soumissions proposées, ont été regroupées en quatre sous-thèmes répartis sur les deux journées du colloque :

- Épistémologie : place des SIG dans la recherche (3 communications),
- SIG et innovations méthodologiques en sciences sociales (6 communications),
- SIG et environnement : mesures et modélisation (6 communications),
- SIG et environnement : ressources et risques (5 communications).

Trois propositions de communication retenues par le comité scientifique n'ont pas fait l'objet d'une présentation orale.

Ce volume des « actes du colloque » présente des versions révisées d'une quinzaine de textes issus des communications et la liste des posters présentés. Les textes engagent la responsabilité de leurs auteurs et non celle du comité scientifique qui en a assuré la relecture et proposé des modifications de corrections. Nous espérons que la diversité des textes et des origines scientifiques contribuera à enrichir les connaissances et débats sur les rapports que les chercheurs entretiennent avec les systèmes d'information géographiques.

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont œuvré à la réalisation de ces journées :

- les membres du comité scientifique et les relecteurs,
- les membres du comité d'organisation,
- les institutionnels pour leur appui,

- les scientifiques qui ont proposé des communications et accepté de participer à cette manifestation,
- les étudiants du DESS Géomatique de la promotion 2002-2003,
- Les institutions et organismes qui ont soutenu financièrement le colloque :
 - l'Université d'Orléans,
 - l'Institut de recherche pour le développement (IRD),
 - le Département du Loiret,
 - la Ville d'Orléans.

Introduction

Qu'apportent les SIG à la recherche scientifique ?

Jean-Marie FOTSING

Qu'apportent les systèmes d'information géographique au monde de la recherche ? C'est à cette question que les chercheurs et enseignants-chercheurs ont tenté d'apporter des réponses au cours du colloque international *Géomatique et applications : apport des systèmes d'information géographique au monde de la recherche* qui s'est tenu au centre IRD d'Orléans les 13 et 14 mars 2003. Il s'agissait de répondre aux trois questions suivantes :

- Pourquoi et comment les chercheurs ont-ils adopté les SIG ?
- Quelle est la place des SIG dans les travaux de recherche ?
- L'utilisation des SIG entraîne-t-elle un changement des paradigmes ?

Cet ouvrage tente une démarche résolument synthétique et pluridisciplinaire de la place et du rôle des systèmes d'information géographique dans la recherche. Il présente les versions révisées des principales communications présentées pour donner la vision la plus large et complète des relations qu'entretiennent les chercheurs avec ces outils de gestion des données à référence spatiale. Il rassemble 14 articles sélectionnés parmi la vingtaine des communications orales présentées ainsi que la liste des posters. Ces textes couvrent un large spectre de sujets regroupés et organisés suivant une articulation à la fois méthodologique et thématique. Le classement et la succession des articles prend en compte trois descripteurs principaux : le(s) domaine(s) disciplinaire(s), les dimensions méthodologiques de l'utilisation des SIG et les finalités des SIG dans le vaste champ de la géomatique et de ses applications.

Trois grandes parties proposent au lecteur divers horizons de réflexion sur l'utilisation des SIG dans la recherche mais aussi l'opportunité appréciable de parcourir l'ouvrage de manière non linéaire :

- les SIG dans la recherche scientifique ;
- les SIG dans les sciences environnementales et appliquées ;
- les SIG dans les sciences humaines et sociales.

Les SIG dans la recherche scientifique rassemble les contributions de portée générale qui constituent en quelque sorte une vaste introduction à l'ensemble de l'ouvrage.

Introduisant le thème du colloque, Jean-Marie Fotsing et Nicolas Devaux de l'université d'Orléans s'interrogent d'abord sur la « réalité » des SIG dans la recherche comme outils ou concepts. Cette question mérite d'être posée au vu de l'extraordinaire diversité des définitions et des disciplines qui ont recours à ces outils. L'inventaire rapide de l'évolution récente de la place des SIG dans la communication scientifique met en évidence leur omniprésence dans tous les champs disciplinaires ayant un rapport avec l'espace. Ils en concluent que « les SIG sont finalement une sorte de « tour

de contrôle » à la croisée de plusieurs disciplines auxquelles ils assurent une certaine cohérence méthodologique et la rigueur du raisonnement scientifique ».

La place des SIG dans la recherche française en géographie est développée par Thierry Joliveau de l'université de Saint-Étienne. Il souligne que ces outils, émergents en 1989, « ... connaissent une période de jeunesse jusqu'en 1996 et une période de maturité après ». Le bilan thématique met en évidence la prédominance « des points de vue méthodologiques, conceptuels et techniques » au détriment « des points de vue épistémologiques et informatiques » peu abordés, voire totalement absents. Finalement, au sein de la recherche française, « ces outils restent un phénomène marginal à l'écart des critiques virulentes dont ils ont été l'objet en Amérique du Nord ».

Dans un contexte pluridisciplinaire, Didier Josselin de l'université d'Avignon, place les SIG dans une perspective d'analyse exploratoire dans le champ plus large de la géomatique entendue comme « ensemble des utilisations techniques de l'informatique en géographie ». L'auteur s'interroge d'abord sur « les relations entre la géomatique et les pratiques de recherche et ce qu'elles apportent ». Il montre ensuite « la duplicité de la géomatique... qui favorise la pluridisciplinarité ». De son point de vue « la géomatique est une métadiscipline qui n'existe qu'à travers les relations entre les disciplines ». C'est bien l'impression générale qui se dégage des exemples développés dans les diverses contributions qui relèvent aussi bien des sciences environnementales et appliquées que des sciences humaines et sociales.

Les SIG dans les sciences environnementales et appliquées regroupe les recherches qui s'intéressent plus particulièrement à l'environnement considéré du point de vue des éléments du milieu dans une approche interdisciplinaire. Ces recherches recourent aux SIG, souvent couplés avec la télédétection, comme outils d'investigation, d'intégration des données et d'analyse. Les terrains d'applications concernent aussi bien les petites que les grandes échelles et portent à la fois sur les milieux humides et apparentés ainsi que les milieux arides et semi-arides.

Dans la perspective d'une gestion intégrée des milieux fragiles, Pascal Dumas et ses collaborateurs de l'unité S 140 ESPACE de l'IRD, utilisent les SIG et la télédétection pour délimiter de façon rigoureuse le littoral de la grande Terre de Nouvelle-Calédonie. Ils montrent que l'emploi des SIG « permet de raisonner sur des bases solides et reconnues ». Avec cet outil, ils montrent que les plaines côtières de cette « île haute » forment « le littoral au sens d'écosystème complet... ». L'intégration des descripteurs physiques, humains et économiques, et le croisement des résultats sous SIG avec l'utilisation du sol issue de l'imagerie satellitaire donnent des résultats satisfaisants et infirment l'hypothèse d'une correspondance nette entre « le littoral de nature et le littoral d'œkoumène dont les limites coïncident parfaitement avec celles de l'écosystème côtier calédonien ».

Sur les zones côtières du golfe de Gascogne Olivier Le Pape de l'IFREMER et ses collaborateurs utilisent les SIG pour valider quantitativement les hypothèses de recherche sur la localisation et la description des habitats préférentiels pour le développement des soles. Par des combinaisons multiples prenant en compte les descripteurs

physiques (bathymétrie, types de sédiments, etc.), les données ichtyologiques (collectées lors des campagnes de terrain) et un modèle hydrodynamique de la côte, « les SIG ont permis d'identifier les secteurs les plus importants dans le développement des soles, localisés dans les zones influencées par l'apports d'eau douce... ». Ces outils permettent ainsi de « définir la contribution des différents habitats au stock global » ; fine connaissance des milieux primordiale pour l'aménagement du littoral.

Pour la gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin versant, Isabelle La Jeunesse et ses collaborateurs de l'Université catholique de Louvain-La-Neuve en Belgique, intègrent les SIG et les outils de modélisation pour « développer un système d'aide à la décision (SAD) ». Le logiciel *MULINO_SAD*, basé sur « la modélisation des indicateurs multidisciplinaires et des analyses multicritères » offre une interface de visualisation et d'appel de données pour supporter la gestion spatiale de la ressource. Sur le site expérimental de la partie wallonne du bassin versant de la Dyle, cet outil intègre le modèle hydrologique SWAT pour « faciliter les échanges entre des modèles hydrologiques et d'occupation du sol mais également la communication avec les gestionnaires ».

Pour le diagnostic et le suivi des vastes pâturages de la haute cordillère de la IV^e Région du Chili, Fabian Reyes de l'Université de la Serrena et ses collaborateurs présentent les étapes de la construction d'un SIG. La mise en place de cet outil de gestion fait appel à « une gamme d'échelles peu couramment prise en compte dans les systèmes d'information géographique » du fait de l'importance des superficies concernées et de la diversité des informations à prendre en compte. Six thèmes pertinents sont retenus pour lesquels des informations sont rassemblées à partir du terrain et/ou des images satellitaires. Les bases de données spatialisées créées peuvent être interrogées à divers niveaux d'organisation administrative. Les auteurs reconnaissent cependant que « les données sociales relatives aux troupeaux y sont difficilement exploitables directement », et espèrent que « les recherches à venir proposeront... des clés relationnelles plus précises et plus exploitables dans un SIG ».

Sur les pâturages plus réduits du Parc national de Nakuru en milieu aride du Kenya, Nicolas Ganzin du GDTA et *al.* montrent comment les SIG permettent de « s'affranchir des contraintes techniques de manipulation des données à la fois environnementales, administratives et socio-économiques ». L'utilisation du SIG a amélioré les résultats des indices de production saisonnière de biomasse issus des données satellites large champ. Ces indices ont été ensuite revus à la baisse par le recours à des filtrages spatiaux (couvert ligneux, accessibilité, appétibilité) puis croisés avec les comptages d'animaux pour produire des indicateurs pertinents pour chiffrer avec précision la capacité de la Réserve à nourrir l'ensemble de sa population animale.

À très grande échelle, Sébastien Bridier et *al.* de l'Université Denis Diderot, spécialistes de climatologie locale, utilisent les SIG pour analyser et évaluer l'impact des modifications de surface induites par les aménagements anthropiques linéaires et quantifier avec précision leurs conséquences sur les activités rurales. En Champagne, ils ont déterminé « la surface du vignoble pour laquelle le risque de gel radian serait accru » avec la construction d'un second remblai du TGV Est. Ce dernier constituerait un nouvel obstacle susceptible de modifier les écoulements d'air froid superficiel. Dans ce

type de modélisation spatiale, « le SIG est considéré comme un ensemble de logiciels qu'il faut mettre en relation... pour répondre à un problème précis ». Son utilisation a permis de « fournir au maître d'ouvrage des cartes permettant de fixer les dernières modifications à apporter à l'ouvrage et aux professionnels agricoles de disposer de documents pour appuyer d'éventuelles demandes d'aménagement ou d'indemnités compensatoires ».

Les SIG dans les sciences humaines et sociales rassemble cinq contributions ayant en commun l'utilisation de outils SIG au service du raisonnement spatial en archéologie, en cartographie et en géographie humaine. Ces présentations montrent les applications des SIG aux questions de recherche d'une part et évoquent d'autre part, leurs perspectives d'évolution dans leurs relations bénéfiques avec la sémiologie graphique et les capacités exploratoires en analyse spatiale.

Pour retracer l'histoire de la ville de Tours et reconstituer les dynamiques spatiales en Indre-et-Loire dans la longue durée, Henri Galinié et *al.* de l'Université de Tours ont construit un SIG « afin de disposer d'une base solide pour leurs recherches ». Ils ont ainsi rassemblé dans une même base de données les nombreuses informations dont ils disposent et en s'appuyant sur un référentiel commun : le cadastre Napoléonien. L'utilisation du SIG en archéologie a permis « une meilleure évaluation de la documentation et de meilleures conditions de comparaison des sources ». Par ailleurs, le SIG « a favorisé les approches multiscalaires, facilité la modélisation des processus de transformation à l'échelle des éléments comme à celle des ensembles et joué un rôle de révélateur de questions insoupçonnées ».

En aval des utilisations de la géomatique, les SIG contribuent à la production cartographique telle qu'illustrée par Philippe Quodverte de l'université d'Orléans. L'auteur s'interroge particulièrement sur les adaptations possibles du cadre théorique de la sémiologie graphique de Jacques Bertin et souligne d'emblée « les faiblesses des SIG dans la restitution cartographique ». Il relève ensuite la place centrale des SIG « dans le contexte d'innovations cartographiques au travers notamment de l'introduction de la troisième dimension, des animations et éventuellement du son ». Ces évolutions, rendues possibles par l'informatisation des procédures, donnent aux SIG « de nouvelles possibilités graphiques permettant de résoudre des problèmes complexes de représentation cartographique ».

Pour analyser les disparités des marchés régionaux du travail en France, Jean Marc Zaninetti de l'Université d'Orléans montre comment « les SIG offrent l'opportunité de développer de nouvelles techniques en analyse spatiale quantitative ». Dans ce contexte il présente la nouvelle méthode de modélisation locale (la régression géographique pondérée ou GWR) développée par les chercheurs de l'université de Newcastle. Cette modélisation GWR, « en intégrant pleinement l'organisation spatiale de l'information géographique, procure à l'analyse spatiale un réalisme permettant de mieux répondre aux besoins des géographes ». Dans ces nouvelles approches, le SIG occupe une position périphérique, en amont et en aval de l'analyse spatiale. Il intervient dans une phase préalable au travers de la cartographie thématique, permet aussi de renseigner

les attributs spatiaux des observations et éventuellement de retraiter une information aréolaire pour corriger les effets de forme et de surface.

Malgré les nouvelles possibilités d'analyse spatiale, Eric Leclerc de l'Université de Rouen pose la question de l'intégration des mobilités humaines dans les SIG. Les études de cas sur les nomades de Mauritanie et les citadins de la ville d'Hyderabad en Inde, montrent que les SIG sont indissociables de la réalité sociale et économique. Les mouvements des nomades, variables dans l'espace et le temps, sont guidés par une multitude de facteurs dans lesquels l'appréciation humaine entre trop souvent en ligne de compte. Les mobilités intra-urbaines font appel à des vitesses de déplacement très variables selon le mode de transport et selon l'heure. « Les mobilités humaines, contrairement à certains phénomènes physiques, sont difficilement modélisables car elles fonctionnent sur des topologies qui ne sont pas exclusivement spatiales ». Si les SIG offrent actuellement « peu de possibilités de gestion des mobilités humaines », il ne faudrait pas que les obstacles techniques et théoriques « excluent de facto les mobilités des recherches utilisant les SIG ». De nouvelles voies de recherche sont encore à explorer.

En abordant la question de « la nécessaire évolution des systèmes d'information géographique », Arnaud Banos de l'Université de Pau dresse une sorte de conclusion partielle sur la place et l'utilité des SIG dans la recherche. Il stigmatise « les insuffisances des logiciels SIG actuels trop peu ouverts », et propose d'accroître la démarche exploratoire en favorisant le principe de « l'abduction » (selon les théories exposées au XIX^e siècle par Charles Sanders Peirce) qui « offre l'avantage de souligner l'une des potentialités majeures des SIG de demain : impliquer réellement l'utilisateur au sein des univers virtuels qu'il manipule, en lui fournissant à cette fin des bouquets de méthodes alternatives et complémentaires, spécifiquement adaptées à la nature géographique de l'information ».

Ces contributions montrent à quel point la confrontation avec les SIG est désormais inévitable surtout pour les chercheurs et praticiens des domaines qui s'intéressent directement ou indirectement à l'espace. Les SIG contribuent ainsi à un renouvellement épistémologique et un enrichissement méthodologique. Par cette synthèse, nous souhaitons participer activement à cette évolution pour faire progresser ces nouvelles perspectives méthodologiques. De ce point de vue, cet ouvrage devrait constituer un document de référence non seulement pour les chercheurs déjà impliqués dans l'utilisation des SIG, mais aussi pour les étudiants et les scientifiques qui auront à se former et à travailler dans des domaines où l'utilisation des SIG devient chaque jour plus importante et complexe avec l'évolution des connaissances et l'apparition de calculateurs de nouvelle génération.

Préface

SIG et recherche, un sujet en devenir

Françoise de BLOMAC, rédactrice en chef de SIG La Lettre

En tentant de répondre à la question « Qu'apportent les SIG au monde de la recherche ? », les quelque cinquante chercheurs, réunis par l'Université d'Orléans en 2003, ont ouvert de multiples pistes de réflexions, dont cet ouvrage se fait l'écho. La réponse s'avère moins simple qu'il n'y paraît. L'usage de l'outil mise surtout sur la capacité intégratrice des SIG, sortes de « tours de contrôle » à la croisée de nombreuses disciplines, comme l'explique dans son introduction Jean-Marie Fotsing. À travers ces articles, une autre approche se dessine pourtant, qui construit un nouveau paradigme scientifique, basé entre autres sur l'exploration interactive des phénomènes spatiaux.

Un tout petit monde

Penser que les SIG sont « les outils naturels des géographes » ne résiste pas à l'épreuve de l'histoire, comme le montre Thierry Joliveau du CRENAM à Saint-Etienne, qui s'attache à mener un premier bilan quantitatif de la recherche SIG en géographie. Avec 7 à 8 thèses par an en français, 7 à 8 % de chercheurs qui se déclarent comme ayant des compétences en SIG et environ 5 % des articles mentionnant SIG parmi les mots-clés, les SIG restent un phénomène marginal dans la géographie française, même si cette dernière ne les a pas accueilli avec le flot de critiques virulentes dont ils ont bénéficié en Amérique du Nord. En effet, dans les années soixante-dix, les attaques allèrent bon train outre-atlantique : positivisme, séparation entre l'objet et le sujet, vision caricaturale des phénomènes culturels et sociaux, traduction simpliste d'un monde réel complexe, logique empirique, recherches pilotées par les données et non par les concepts, dépendance vis-à-vis des fournisseurs de données et de logiciels, naïveté politique de chercheurs instrumentalisés, développement d'une vision de type « big brother » etc., la liste fut longue et certains débats perdurent.

De plus, il faut avouer que les SIG ont mis bien des années à acquérir leurs lettres de noblesse en matière de cartographie, qui reste une de leurs applications majeures, notamment en France où la cartographie automatique est clairement perçue comme l'ancêtre des SIG. Comment mettre en œuvre les règles sémiologiques édictées par Bertin avec des traceurs incapables de remplir un zonage ? Encore aujourd'hui, Philippe Quodverte, directeur de la MST Carto d'Orléans, découvre de nombreuses « horreurs » produites avec des SIG, même s'il appelle de ses vœux une sémiologie renouvelée par l'apport de l'informatique, notamment en termes de visualisation en trois dimensions, d'interactivité et de capacités d'animation.

« L'informatique d'aujourd'hui est bien différente de celle d'il y a 30 ans » notait encore Thierry Joliveau pendant le colloque, « de nombreuses critiques d'hier n'ont plus lieu d'exister. La géomatique peut être considérée comme un outil pour déchiffrer

le monde numérique qui se construit, sorte de double digital de la planète, toujours plus précis et plus complet, sur lequel des décisions sont prises quotidiennement ». Les articles regroupés ici relèvent de deux approches. La première, majoritaire, considère bien les SIG comme des outils au service du raisonnement spatial. La deuxième, plus diffuse, pose les prémisses d'une nouvelle définition de l'acronyme en tant que « Science de l'information géographique ».

SIG : les outils du raisonnement spatial

Les chercheurs qui présentent ici leurs travaux ne sont pas tous géographes, tant s'en faut : hydrologues, agronomes, historiens, informaticiens... tous reconnaissent de nombreuses qualités aux SIG.

Réceptacle. C'est avant tout un réceptacle d'informations éparses, *a priori* difficiles à comparer. Ainsi, en matière de gestion des zones humides, une équipe pluridisciplinaire appuyée par l'École des hautes études en sciences sociales a construit un modèle conceptuel de données élaboré pour prendre en compte les multiples aspects des milieux tourbeux et développer un SIG exploitable à la fois à des fins de recherche (influences réciproques de la tourbière et de l'hydrologie, évolution du paysage...) et de gestion d'un espace protégé (état des lieux, évaluation de l'impact écologique de la gestion mise en place, stratégie et modalités d'action, concertation et communication...). Même atout pour les historiens de l'université de Tours qui se servent d'un SIG (à travers des applications qu'ils ont développées) pour retracer l'histoire de la ville, comprendre son développement en rassemblant dans une même base de données les nombreuses informations dont ils disposent, le tout en s'appuyant sur un référentiel commun, le cadastre Napoléonien.

Production d'indicateurs. Par sa capacité à générer des données issues de traitements plus ou moins complexes, les SIG servent à la production d'indicateurs pertinents pour l'action. Ainsi, Nicolas Ganzin du GDTA s'est servi d'images issues des capteurs NOAA et VEGETATION pour produire des indices de production de biomasse sur le parc de Nakuru au Kenya. Ces premiers indices ont ensuite été revus à la baisse en prenant en compte une série de filtres spatiaux (couvert ligneux, accessibilité, appétibilité). Croisés avec des comptages sur les animaux présents, il a pu chiffrer avec précision la capacité de la réserve à nourrir l'ensemble de sa population animale, même s'il reconnaît volontiers les limites scientifiques de la démarche. Dans un autre registre et à une échelle totalement différente, des spécialistes de la climatologie locale ont pu chiffrer et représenter avec précision l'impact d'un remblai du TGV Méditerranée sur la production fruitière. En effet, situé dans le sens du Mistral, le remblai tend à canaliser le vent et fragilise ainsi les arbres non protégés par des brises vents. En champagne, le SIG a permis de mesurer avec précision la surface de vignoble pour laquelle le risque de gel radian (gel nocturne qui stagne par les nuits sans vent et s'écoule depuis la montagne de Reims comme un liquide) serait accru par la construction d'un autre remblai pour le futur TGV Est. L'approche quantifiée a permis de convaincre les autorités (Réseaux ferrés de France) de modifier le projet et de prévoir un pont, qui laisse passer l'air et ne le bloque plus en bas de sa pente naturelle.

Validation quantitative d'hypothèses. Bien souvent également, les SIG permettent de mettre des chiffres derrière des approches plus intuitives. Ainsi, une équipe de l'Ifremer a clairement identifié les zones côtières du golfe de Gascogne les plus importantes dans le développement des soles. « Le SIG ne nous a pas appris que les zones vaseuses et peu profondes étaient celles où les juvéniles de soles étaient les plus concentrés, nous le savions déjà. Mais il nous a permis de dire à quel point ces zones sont importantes » notait en conclusion de sa présentation Olivier Lepape. De même, n'importe quel observateur peut se rendre compte que les plaines côtières de Nouvelle Calédonie forment le véritable littoral, au sens d'écosystème complet, de cette île « haute ». Mais pouvoir le démontrer en croisant topographie, localisation des agglomérations et des tribus et montrer ainsi que plus de 99 % de la population urbaine vit en dessous de la courbe des 100 mètres, ainsi que 87 % de la population tribale, permet de raisonner sur des bases « reconnues » (projet mené conjointement par l'IRD et des étudiants de l'université d'Orléans).

Un outil pas encore parfait

Les chercheurs n'ont pas pour autant une vision idyllique de leurs outils. Si les SIG sont un réceptacle idéal, assurer la mise en base de données de sources variées ne se fait pas sans mal. Les problèmes liés aux échelles ont été plusieurs fois soulevés : certaines modélisations finissent par s'appuyer sur des granularités très variées et les passages vecteur/raster sont souvent multipliés. De plus, la structure même des SIG n'est pas prête à accueillir n'importe quelle sorte de données. Les historiens se frottent ainsi aux limites dans la gestion de données temporelles. « Il faut de nombreuses années pour que les méthodes de modélisation spatiale soient implémentées dans les SIG » regrette Jean-Marc Zaninetti de l'université d'Orléans, qui constate que les notions de krigeage par exemple, qui ont fait une apparition récente dans les outils logiciels du marché, sont le fruit de concepts nés il y a maintenant plus de 20 ans ! Et de proposer une nouvelle modélisation dite « locale », issue des travaux de l'université de Newcastle, qui ajoute un filtre mobile spatial centré sur les éléments étudiés, qui ne semble pas prêt d'être intégré dans un MapInfo ou un ArcInfo, pour ne citer que les deux logiciels les plus utilisés par les équipes de recherche présentes. Les créateurs de la méthode, qui viennent de publier un livre pour l'expliquer (*Geographically Weighted Regression : The Analysis of Spatially Varying Relationships* par C. BRUNSDON, M.E. CHARLTON et A.S. FOTHERINGHAM), proposent d'ailleurs avec celui-ci un petit outil logiciel « maison », baptisé GWR.

Au-delà de l'outil, une méthode. Plusieurs articles mettent l'accent sur l'apport du SIG en tant qu'aide à la formalisation du savoir, non pas tant dans ses résultats, mais dans le processus même de réflexion. De la méthode au concept et au développement d'un nouveau paradigme scientifique, il y a un pas que certaines équipes osent franchir.

Une nouvelle approche scientifique ?

Couplage modèle-SIG. Une première approche consiste à mêler le plus étroitement possible les outils de modélisation et les SIG. Il ne s'agit plus ici d'assurer le transfert d'informations entre les deux processus, mais bien de les intégrer afin de passer de

l'un à l'autre dans un environnement unifié. C'est par exemple la démarche de MULINO, un outil qui intègre à la fois une organisation de l'information sous forme de causes et d'effets (définition d'indicateurs synthétiques dans le SIG), un outil d'analyse multicritères qui aide le décideur à étudier différentes alternatives et un modèle hydrologique (SWAT), le tout développé dans le cadre d'un projet européen de gestion intégrée de la ressource en eaux. On retrouve le même type d'approche dans le cadre du programme PIREN Seine, pour lequel Denis Ruelland, du CNRS a intégré SIG et modèle hydrologique au sein d'un outil baptisé Sénèque, mis en place aujourd'hui à l'agence de l'Eau Seine-Normandie.

Analyse exploratoire. Ce sont sans doute les outils développés par Didier Josselin (Université d'Avignon) et son équipe (alors à l'université de Franche-Comté), qui représentent la forme la plus achevée d'analyse exploratoire de l'espace. En mettant en œuvre de nombreux algorithmes d'analyse spatiale et en multipliant l'interactivité avec la représentation (sous forme de cartes, tableaux, diagrammes de tous types), l'utilisateur peut alors être « surpris » par une observation et laisser place à sa créativité pour analyser et modéliser le phénomène qu'il observe. C'est ce que Arnaud Banos, aujourd'hui à l'université de Pau, appelle « l'abduction », selon les théories exposées au XIX^e siècle par Charles Sanders Pierce.

Seul petit problème, les outils d'analyse exploratoire présentés sont des développements universitaires, totalement en marge des outils commerciaux et aujourd'hui encore, certainement peu exploitables par des néophytes. Mais c'est sans doute dans cette nouvelle approche scientifique, qui va au-delà des raisonnements classiques (induction, déduction), que les SIG trouveront une nouvelle place originale.

Cet ouvrage rassemble les principales interventions présentées lors du colloque. De la recherche scientifique, aux sciences de l'homme et de la société en passant par l'environnement... les SIG s'y présentent à la fois en tant qu'outils et objets de la recherche, alimentant ainsi un débat qui n'est pas prêt de s'achever.

Les SIG dans la recherche scientifique

Les Systèmes d'information géographique : place et évolution dans les disciplines et la communication scientifiques

Jean-Marie FOTSING, Université d'Orléans - IRD Orléans, France
Nicolas DEVAUX, Maison de la télédétection, Montpellier, France
E-mail : jean-marie.fotsing@univ-orleans.fr

Résumé : Depuis les années quatre-vingts, on assiste à la multiplication des Systèmes d'information géographiques (SIG) dans de nombreux domaines et notamment dans la recherche scientifique. Il est devenu difficile aux chercheurs, en particulier dans les disciplines s'intéressant à l'espace ou ayant des rapports avec lui, d'éviter la « confrontation » avec les SIG. Cette émergence participe de deux faits : d'une part, la volonté d'une meilleure compréhension du monde réel désormais considéré et analysé dans toute sa complexité, d'autre part, la vulgarisation des moyens informatiques qui permettent dorénavant de traiter plus rapidement cette complexité. De plus en plus, les SIG se généralisent dans de nombreux domaines de la recherche fondamentale et appliquée, avec toutefois une certaine imprécision dans la définition du vocable et de son contenu. Alors, Système d'information géographique : concept ou outil ? La question mérite d'être posée au vu de l'extraordinaire diversité des thèmes abordés et des multiples variantes méthodologiques que recouvre cette dénomination. À partir d'une synthèse réalisée sur plus de 10 millions d'articles des revues scientifiques disponibles sur internet, cette communication tente d'évaluer le rôle croissant des SIG et son évolution récente dans la recherche scientifique.

Mots clés : Recherche scientifique, disciplines scientifiques, espace, territoires, revues scientifiques, outil, SIG.

Geographic Information Systems: place and evolution in Scientifics disciplines and reviews

Abstract: *Since the 80's, GIS have spread in numerous professional fields, and in particular in scientific research activities. It has become difficult for scientists, especially for those working on space related topics, not to "confront" with the use of GIS. This trend can be understood at the light of two observations: firstly, the will for a better comprehension of the world, analyzed in its diversity and complexity; secondly, the great divulgation of computational methods, able to analyze in shorter periods of time this complexity. GIS invest more and more domains of applied and fundamental sciences with however a certain inaccuracy in the definition of the term and its contents. In this context, a question can be addressed: geographic information system, concept or tool? The issue should be dealt in function of the extraordinary diversity of themes and methodological aspects embraced by the denomination. This communication aims at assessing the growing role of GIS and its recent evolutions in scientific research, based on a synthesis compiled with over 10 million scientific references available on the internet.*

Key words: *Scientific research, scientific domains, space, territory, scientific reviews, tool, GIS.*

Introduction

Les Systèmes d'information géographique (SIG) ont fait leur apparition dans les années soixante, soixante-dix pour répondre aux besoins de plus en plus croissants de l'utilisation des cartes pour la gestion des ressources naturelles. Ils résultent de l'association des ressources des Systèmes gestionnaires de bases de données relationnelles (SGBDR) avec celles de la cartographie rendue possible par le développement de l'informatique. Comme outils de gestion, les SIG ont trouvé de larges domaines d'application et sont aujourd'hui utilisés par tous les acteurs de l'aménagement du territoire, au sein des administrations publiques et privées et dans la plupart des services qui s'intéressent à l'espace, aux territoires et aux localisations. Cette généralisation des SIG dans des champs d'application variés s'accompagne aussi d'une utilisation fréquente de ces outils dans la recherche. En effet, des chercheurs d'horizons disciplinaires variés ont de plus en plus recours aux SIG comme outils de traitement et d'analyse des données, de production et de restitution des résultats de leur recherche. Les sciences de l'ingénieur, dont les recherches sont davantage tournées vers les applications, ont ainsi été les premières à saisir les possibilités nouvelles offertes par les SIG. Mais l'emploi de ces outils tend aussi à se généraliser dans le domaine plus académique des recherches universitaires en dépit de la place encore très marginale accordée à la recherche dans les grands salons consacrés aux SIG. Cette impression est largement confortée à la lecture de la presse spécialisée dont les publications sont dominées par trois grands domaines d'application : la gestion territoriale, la gestion des problèmes d'environnement et la gestion commerciale, concept recouvert par le vocable « géomarketing ».

Cette communication se propose de dresser un tableau général et synthétique de la place des SIG dans les disciplines traditionnelles et leur évolution dans la communication scientifique. Il s'agit d'une contribution de portée générale qui constitue une sorte d'introduction au thème du colloque : « apport des SIG au monde de la recherche ». Aussi, essayerons-nous d'abord de définir les Systèmes d'information géographique(s) et d'en présenter les champs d'application en rapport avec les disciplines traditionnelles. Ensuite, nous tenterons une approche quantitative de l'évolution de ces outils dans la presse spécialisée à partir d'investigations réalisées sur plus de 10 millions d'articles des revues scientifiques disponibles sur internet.

Les SIG : outils ou concepts ?

SIG ou Systèmes d'information géographique est la traduction de l'acronyme anglais GIS, qui signifie à la fois *Geographic Information Systems* et *Geographic Information Science*. Cette double signification nous amène d'emblée à poser les deux questions suivantes : qu'est-ce qu'un Système d'information géographique ? Quelles sont les disciplines scientifiques de l'information géographique ?

Les SIG comme Systèmes d'information géographique(s)

Qu'est-ce qu'un Système d'information géographique ? Il ne nous paraît pas évident de répondre à une telle interrogation, ou tout au moins d'en donner une définition sim-

ple ou unique. Tantôt employé au singulier, tantôt au pluriel, le terme SIG ne peut avoir la même signification dans les deux cas. La pluralité sémantique du terme Système d'information géographique rend *a priori* difficile sa définition. Au singulier, il a un sens restreint qui renvoie implicitement à la seule composante logicielle du SIG baptisée Logiciel d'information géographique ou LIG (Zaninetti, 2004). Pour définir plus largement la notion de SIG, on peut d'abord partir de celle, plus générale, de système d'information : « système permettant de communiquer et de traiter l'information » (Larousse). Un SIG est donc par définition un système permettant de communiquer et traiter l'information « géographique ».

L'information géographique recouvre des types très variés, qu'il s'agisse d'objets ou de phénomènes physiques, d'êtres vivants ou de sociétés humaines..., dès lors qu'ils sont reliés à un espace défini ou à un territoire. Un SIG aura donc pour vocation d'informer l'utilisateur sur ce territoire ; le paramètre essentiel étant la localisation. Par exemple, tel objet est à tel endroit. Il est voisin de tel autre. Il est situé à telle distance de tel autre. Tel phénomène affecte telle surface et se superpose à tel autre phénomène... Le SIG est donc « un type particulier de système d'information dont la base de données contient des informations reliées à des entités physiques, des activités ou des événements localisés et assimilables aux formes géométriques de points, de lignes et de zones. Un SIG gère les informations spécifiques à ces points, lignes et zones pour extraire les données requises afin de réaliser des recherches et des analyses spécialisées » (Dueker, 1979). Comme instruments, les SIG sont avant tout des outils de communication, de traitement et d'information sur les territoires. On comprend pourquoi leur généralisation dans les années quatre-vingts résulte d'abord de l'accroissement considérable des capacités des micro-ordinateurs en matière de stockage, de traitement et de restitution de l'information géographique.

Pour les auteurs anglo-saxons, « a GIS is a computer-based system that provides the following four sets of capabilities to handle georeferenced data: input; data management (data storage and retrieval); manipulation and analysis; output » (Pazner, 1989). Cette acception des SIG outils est la plus répandue comme en témoignent de nombreuses définitions qui privilégient leurs fonctionnalités. C'est ainsi que pour Aranoff et al. « GIS are systems composed of software used to collect, store and manipulate spatially referenced data. In practical terms, GIS are computer programs used to process and answer questions about spatial data » (Aranoff et al., 1989). Goodchild va dans le même sens et considère les SIG comme : « Integrated computer tools for handling, processing and analysing geographical data » (Goodchild et al., 1994). Les SIG sont un ensemble puissant d'outils pour saisir, conserver, extraire, transmettre et afficher les données spatiales décrivant le monde réel (Burrough et al., 1989).

Brunet et al., soulignent la complexité de ces outils lorsqu'ils définissent les SIG comme « des systèmes automatisés d'enregistrement et d'analyse des données dont le matériel et le logiciel ont été spécialement conçus pour traiter des données géographiquement référencées et les attributs qui s'y rapportent » (Brunet et al., 1992). Plus loin, ces auteurs précisent qu'un « SIG est un SGBD qui se distingue des SGBD « relationnels » par sa capacité à structurer les données sur la base de critères spécifiquement spatiaux comme la localisation ou la distance... En plus d'un SGBD, un SIG renferme

de nombreuses fonctions de cartographie automatique ou assistée par ordinateur, ainsi que des moyens informatiques permettant l'édition du résultat des traitements. Mais la principale originalité d'un SIG réside dans sa capacité à mettre en relation des données graphiques (les éléments des cartes enregistrées dans le système) et des données non graphiques comme, par exemple, des statistiques établies sur les objets spatiaux dont les éléments graphiques donnent une représentation » (Brunet et *al.*, op. cit.).

Au-delà des outils et de leurs fonctions spécifiques, les SIG se définissent par ailleurs comme « une structure institutionnelle qui utilise la technologie des SIG pour gérer une banque de données et exercer son mandat spécifique avec un financement stable et continu » (Carter, 1989). De la sorte, un SIG est une organisation comportant trois types de composantes : technologiques (matériel et logiciel), informatives (bases de données géographiques et attributs associés) et infrastructurelles (personnel, installations, services de support) (Dickinson et Calkins, 1988). Le qualificatif « géographique » jusque-là associé à l'information renvoie désormais aux systèmes et prend la marque du pluriel ; le SIG au singulier se rapportant plus spécifiquement aux composantes matérielles et logicielles de ces systèmes. En définitive, les SIG sont « 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 » (de Blomac et *al.* 1994).

Ces quelques définitions donnent toute la mesure des difficultés à trouver aux SIG une définition simple et unanimement admise. Ces difficultés ont poussé certains auteurs à définir les SIG par référence à leur domaine disciplinaire : Systèmes d'information urbains (SIU) pour l'urbanisme, Systèmes d'information environnementaux (SIE) pour l'environnement, systèmes d'information spatialisés (SIS) pour l'informatique, Systèmes d'information stratégiques (SIS) pour la défense, etc. Ces déclinaisons sémantiques, loin de clarifier la situation, ajoutent davantage à la confusion. D'autres auteurs enfin, s'inscrivent dans le champ plus large de la géomatique considérée comme « ensemble des traitements informatiques des données géographiques » (Journal officiel, 1994), réfutant à juste titre la division entre les différentes démarches d'analyse de données. Ils préfèrent alors parler de système de production et de traitement d'informations spatio-temporelles, inscrivant les SIG dans les sciences de l'information géographique.

Les SIG comme sciences de l'information géographique

Définir les SIG par leurs caractéristiques fonctionnelles ontologiques de « traitement de l'information géographique » nous place dans le paradigme cybernétique des Sciences de l'information géographique. La généralisation des SIG, au-delà des capacités matérielles et de la démocratisation de l'informatique, résulte aussi de l'intensification des problèmes d'environnement et d'aménagement de l'espace et de l'attrait qui en découle pour les approches multidisciplinaires et multi-thématiques. Un SIG peut être confronté à des questions se rapportant à une multiplicité de domaines d'application. Mais il doit pouvoir permettre de répondre aux cinq questions récurrentes de base qui sont :

- où : où se trouve cet objet, ce phénomène ?
- quoi : que trouve-t-on à cet endroit ?
- comment : quelles relations existe-t-il entre ces objets ou ces phénomènes ?
- quand : à quels moments des changements sont-ils intervenus ?
- si : que se passerait-il si tel ou tel scénario d'évolution se produisait ?

Ces questions renvoient à des domaines d'application et des champs disciplinaires extrêmement variés. Mais les principaux domaines où les SIG interviennent directement sont l'aménagement du territoire, la gestion urbaine, la circulation automobile, l'agriculture, la protection de l'environnement, les risques naturels... Ils sont utilisés pour gérer et étudier une gamme très diversifiée de phénomènes et de réseaux de phénomènes :

- Ressources naturelles : protection des zones humides, études d'impact environnemental, évaluation du potentiel paysager, gestion des produits dangereux, modélisation des eaux souterraines et dépistage des contaminants, études des habitats fauniques et des migrations, recherche du potentiel minier, etc.
- Réseaux urbains : localisation à partir des adresses civiles, planification des transports, développement de plan d'évacuation, sélection de sites, planification et distribution des flux de véhicules, localisation des accidents, sélection d'itinéraires, etc.
- Administration municipale : gestion du cadastre, zonage, évaluation foncière, gestion de la qualité des eaux, entretien des infrastructures, études d'impact aménageur, schémas d'aménagement, etc.
- Gestion des installations : localisation des câbles et tuyaux souterrains, rééquilibrage des réseaux électriques, planification et entretien des installations, localisation des dépenses énergétiques, etc.
- Commerce : analyse de la structure des marchés, planification des développements et ciblage des clientèles visées, analyse de la concurrence et des tendances des marchés, etc.
- Santé : épidémiologie, répartition et évolution des maladies et des décès, distribution des services sociaux-sanitaires, plans d'urgence, etc.
- Protection de l'environnement : étude des changements globaux, suivi des changements climatiques, biologiques, morphologiques, océaniques, etc.

Par la diversité des champs d'application, les SIG comme Sciences de l'information géographique intègrent des principes et des méthodes issues de plusieurs disciplines traditionnelles :

- La géographie : identification des modalités d'organisation spatiales des classes de phénomènes, des processus et des méthodes d'analyse spatiale...
- L'aménagement : applications pour la gestion et le développement des espaces et des territoires.
- L'informatique : conception assistée par ordinateur, infographie, SGBD, algorithmique, intelligence artificielle, génie logiciel, structuration des données, stockage...
- La cartographie : méthodes de représentation de l'espace géographique à différentes échelles...
- La télédétection : techniques d'acquisition et de traitement de données obtenues avec des capteurs satellitaires et/ou aéroportés.

- La statistique : méthodes d'analyse, de synthèse et d'interprétation des données.
- La mathématique : géométrie analytique, topologie, trigonométrie, théorie des graphes, algèbre, calcul différentiel et intégral.
- La photogrammétrie : interprétation de photographies aériennes et techniques de mesure en trois dimensions.
- Le génie civil : applications en transport, génie urbain, etc.
- La géodésie: méthodes de localisation de haute précision.

Au total, les divers champs d'application et les domaines concernés par les SIG leur donnent une dimension réellement transversale dans les disciplines qui s'intéressent à l'espace et donc à l'information géographique. Cette position interpelle la géographie qui progressivement intègre ces nouveaux outils d'analyse spatiale dans ses approches méthodologiques. Aussi, les géographes, et plus particulièrement ceux qui utilisent ces outils, se tournent-ils plus naturellement vers les disciplines apparentées et entretiennent avec elles des collaborations plus étroites et fécondes : géologie, pédologie, agronomie, économie..., collaborations facilitées par le recours aux SIG.

Évolution des SIG dans la communication scientifique

Pour évaluer de façon quantitative l'évolution de la place des SIG au sein du monde de la recherche, une analyse a été conduite à partir des publications scientifiques disponibles via internet. L'indicateur principal de cette étude est le nombre d'articles parus chaque année et ayant fait référence au SIG dans leurs mots clés. Afin de couvrir au mieux le monde de l'édition scientifique et avoir accès au plus grand nombre de revues scientifiques différentes, nous avons interrogé deux bases de données : *Web of Science* (<http://wok.mimas.ac.uk/>) et *Science direct* (<http://www.sciencedirect.com/>).

Ces deux portails offrent un accès direct aux titres et parfois aux textes intégraux des articles référencés. Ils couvrent à eux deux une partie importante du panel thématique des différentes disciplines scientifiques. Pour autant, il faut noter que la constitution de ces deux bases de données d'articles se fait progressivement. Ainsi, les articles antérieurs aux années quatre-vingt-dix sont encore rarement intégrés, ou du moins ne l'étaient pas lors de la réalisation de cette étude en 2003. La période couverte va de 1991 à 2002. De plus nous avons restreint notre recherche aux seuls titres anglophones. Cette limitation est relativement compensée par le fait qu'une communication traite spécifiquement des SIG dans la recherche française (cf. Joliveau, p. 35 à 55). Les deux bases de données ne sont pas organisées de la même façon. Elles donnent chacune une vision particulière de la place et de l'évolution des SIG et sont par conséquent complémentaires. Aussi, nous les analysons séparément pour en tirer des conclusions générales sur l'importance des SIG dans les disciplines scientifiques.

Enseignements tirés de l'analyse de la base de données « *Web of Science* »

La base de données du site *Web Of Science* regroupe des revues scientifiques rattachées aux sciences dites « dures » (<http://wok.mimas.ac.uk/>). Par conséquent, il y a très peu de titres de revues traitant des sciences sociales. Cette première analyse va

surtout faire ressortir la place des SIG dans les sciences de l'ingénieur. Sur ce portail, on dénombre 54 revues dont le titre contient le terme « geograph* » (Annexe 1). Par contre, sur ces 54 titres, moins de 10 peuvent être directement associés à la géographie humaine du fait de leur intitulé ; les autres traitent de géographie physique.

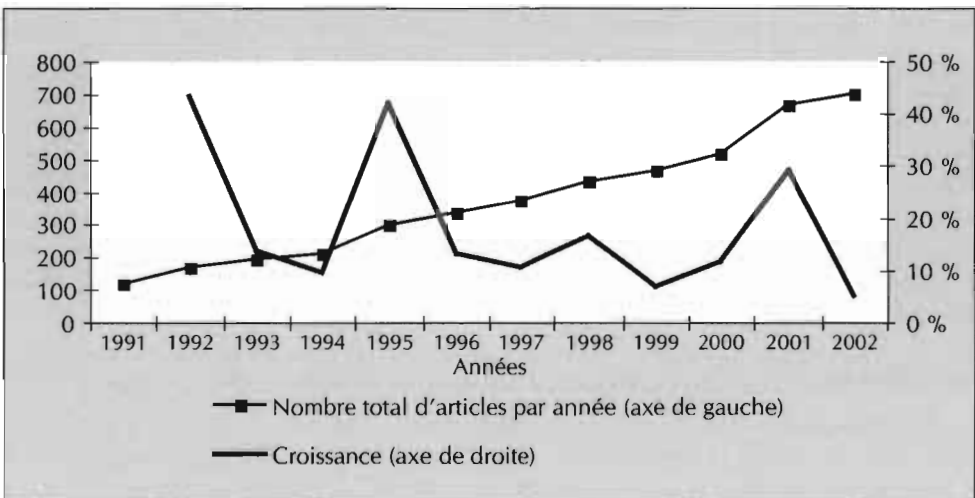
Le portail donne accès à un total de 5 896 revues, soit plus de 10 millions d'articles. En utilisant le mot clés « GIS », notre recherche fait ressortir 4 473 articles qui traitent de façon directe ou indirecte des SIG. Ces articles ont été publiés dans 884 revues différentes, soit 15 % du nombre total de revues disponibles via ce portail (cf. tab.1 et fig. 1).

Tableau 1 - Évolution du nombre d'articles ayant un lien direct ou indirect avec les SIG

Années	Nombre total d'articles	Progression annuelle (nombre d'articles)	Croissance en %
1991	118		
1992	169	51	43,2
1993	192	23	13,6
1994	210	18	9,4
1995	298	88	41,9
1996	337	39	13,1
1997	372	35	10,4
1998	433	61	16,4
1999	463	30	6,9
2000	516	53	11,4
2001	666	150	29,1
2002	699	33	5,0

Source : Web of Science

Figure 1 - Évolution du nombre d'articles ayant un lien direct ou indirect avec les SIG



Les données du tableau 1 et le graphique qui en découle illustrent bien la progression de la place des SIG dans les articles scientifiques. D'une année à l'autre, la croissance du nombre d'articles parus est toujours positive, voire à deux chiffres. Deux années semblent primordiales : 1992 et 1995 qui affichent des taux de croissance supérieurs à 40 %. La forte croissance de ces deux années, respectivement de 43,2 % et 41,9 %, peut s'expliquer par l'arrivée sur le marché de logiciels plus simples d'utilisation et utilisables via un PC. C'est le cas des logiciels Arcview ou MapInfo. Ces logiciels ont permis à des non spécialistes d'avoir recours à l'utilisation de SIG, ce qui n'était pas le cas avec des logiciels comme ArcInfo dont l'utilisation demande une grande connaissance des SIG et requiert une plus longue période d'apprentissage. Ces « logiciels bureautiques » ont donc permis une certaine démocratisation de l'utilisation des SIG. L'année 2001 enregistre une croissance de près de 30 %. Mises à part ces années spéciales, la moyenne annuelle de la croissance est de l'ordre de 10 %. Seule l'année 2002 et 1999 dans une moindre mesure, semblent infléchir cette hausse avec des croissances de 5 % et 6,9 %. Pour autant, nous pouvons constater qu'en dépit de cette petite baisse de croissance, le nombre total d'articles parus en 2001 est quasiment six fois supérieur au nombre d'articles parus dix ans plus tôt.

Ces chiffres doivent donc être utilisés avec précaution. En effet, ils sont tributaires des choix pratiqués concernant les titres des revues accessibles via ce portail internet. De plus, la tendance actuelle est à l'augmentation du nombre de revues disponibles pour la publication d'articles scientifiques, ce qui peut en partie expliquer l'augmentation constante du nombre d'articles ayant un lien direct ou indirect avec ces nouveaux outils. Toutefois, si ces explications permettent de relativiser un tant soit peu cette croissance, il paraît irréfutable qu'elle demeure importante et ne peut être contestée. Par ailleurs, elle témoigne de l'importance grandissante qu'ont pris les SIG dans la recherche scientifique durant cette dernière décennie.

Enseignements tirés de l'analyse de la base de données « *Sciences Direct* »

Sur le site de *Science Direct* (<http://www.sciencedirect.com>), nous avons mené une deuxième étude, similaire à la précédente, en recherchant toujours les articles où « GIS » apparaît dans les mots clés. Ce portail offre, par rapport à celui de *Web of Science*, un regroupement des revues selon des thématiques de recherche. Ainsi, il est divisé en une vingtaine de grandes disciplines de recherche, comme par exemple « les sciences de l'agronomie et de la biologie », « le génie civil » ou bien « la philosophie ». Ce classement permet cette fois de dépasser la simple analyse quantitative globale pour y adjoindre une vision disciplinaire. Cela nous permet d'étudier les liens entre des thématiques identifiées et le nombre d'articles faisant référence aux SIG. Notons aussi que, contrairement au portail précédent, le choix des revues mises en ligne est plus hétéroclite. Par conséquent, *Science Direct*, bien que possédant un nombre plus limité de revues, laisse plus de place à des disciplines de type sciences humaines, comme la psychologie ou les sciences sociales.

Enfin, ce site possède des références antérieures à 1990. Nous avons donc pu interroger la base de données sur les articles parus avant 1991. Pour autant, la totalité des

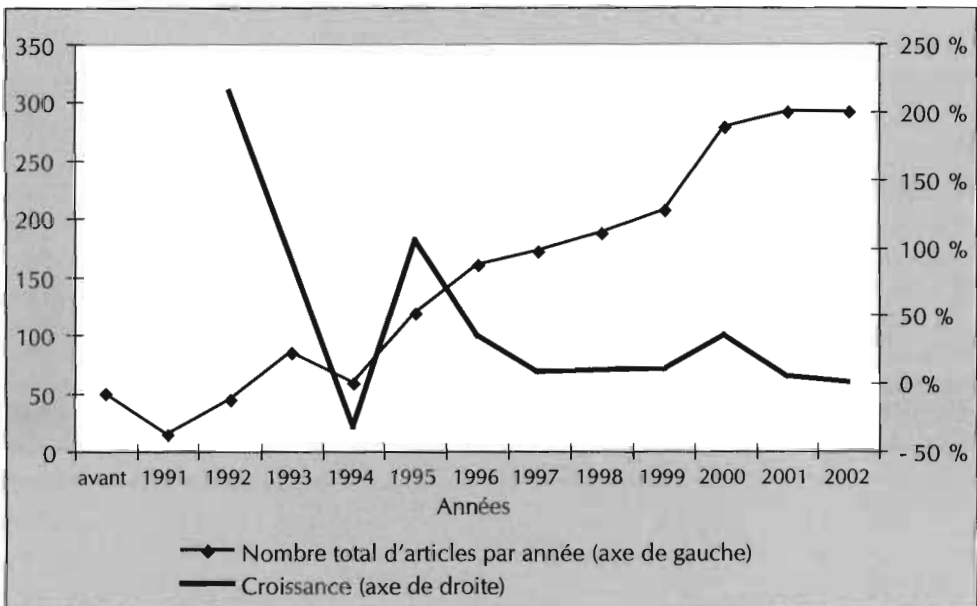
articles rassemblés sur cette période est inférieure à cinquante, chiffre qui est annuellement dépassé dès 1993. Ceci montre bien, comme nous l'avons suggéré dans l'étude précédente, que l'essor des SIG est prégnant depuis les années quatre-vingt dix.

Tableau 2 - Évolution du nombre d'articles ayant un lien direct ou indirect avec les SIG

Années	Nombre total d'articles	Progression annuelle (nombre d'articles)	Croissance en %
avant	50		
1991	14		
1992	44	30	214,290
1993	85	41	93,182
1994	58	- 27	- 31,760
1995	119	61	105,170
1996	160	41	34,454
1997	172	12	7,500
1998	187	15	8,721
1999	207	20	10,695
2000	279	72	34,783
2001	291	12	4,301
2002	292	1	0,344

Source : *Science Direct*

Figure 2 - Évolution du nombre annuel d'articles ayant un lien direct ou indirect avec les SIG



Le portail *Science Direct* donne accès à un total de 1 800 revues, soit trois fois moins que celui de *Web of Science*, mais totalise tout de même plus de cinq millions d'articles consultables (cf. tab. 2 et fig. 2). L'étude des publications de ce portail montre un nombre de publications annuelles plus faible que pour le portail *Web of science*, chiffre qu'il faut relativiser en rapport avec le faible nombre de revues disponibles.

En dépit des différences significatives entre les deux bases de données, les tendances identifiées précédemment sur les données de *Web of Science* (cf. tab. 1 et fig.1) se révèlent aussi sur les données de *Science Direct* (tab. 2 et fig. 2). L'année 1992, avec un taux de croissance supérieur à 200 %, est une année importante concernant la croissance du nombre de publications ayant un lien avec les SIG. Par contre, les années suivantes sont plus erratiques en terme de tendance générale, avec des taux de croissance parfois négatifs comme en 1994 (-31,76 %), ou très faibles comme en 1997 (7,5 %), 2001 (4,3 %) et 2002 (0,3 %). Le choix des titres disponibles permet d'expliquer cette tendance. En effet, ces titres ne sont pas forcément des revues ayant trait aux disciplines qui s'intéressent à l'espace et donc pouvant faire appel directement ou indirectement aux SIG.

Pour affiner l'analyse, nous avons classé les publications en deux catégories suivant les champs disciplinaires. Le regroupement des disciplines s'est fait suivant l'importance du nombre de publications. Le seuil de la partition est situé à vingt publications annuelles à partir de 1997. Cette répartition permet de distinguer d'une part, les disciplines fortement liées aux SIG (tab. 3 et fig. 3), et d'autre part, celles qui n'ont recours aux SIG que de façon sporadique (tab. 4 et fig. 4).

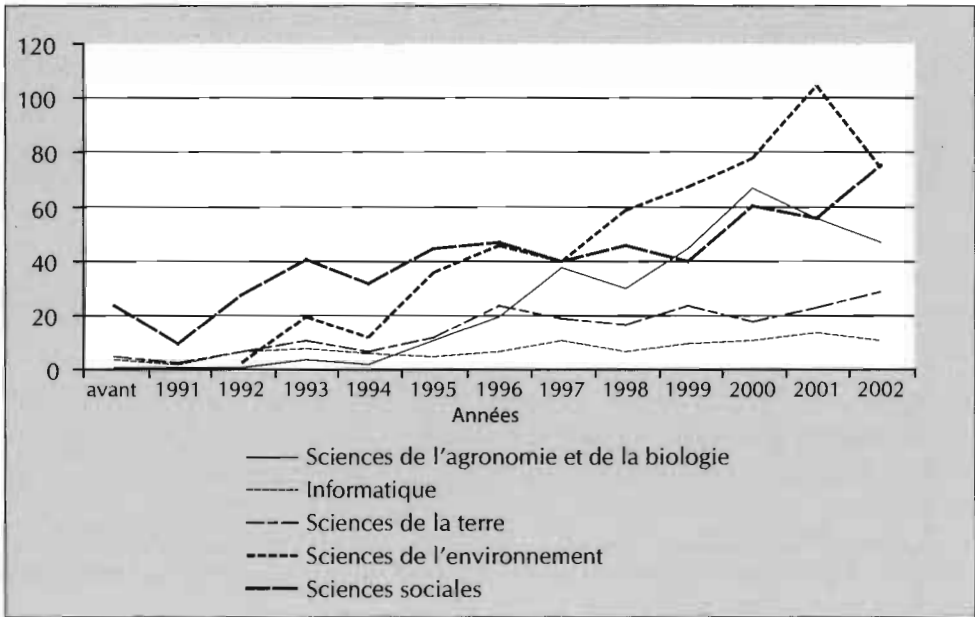
Pour les disciplines de la première catégorie, le nombre élevé de publications illustre clairement l'importance des SIG dans ces disciplines. Exceptées les revues dites informatiques, qui contribuent de part leur travail à l'amélioration des SIG, les autres disciplines sont celles qui sont directement consommatrices d'espace et par conséquent les plus utilisatrices des SIG. En effet, l'espace est une composante primordiale qui tend à prendre de l'importance dans l'ensemble des disciplines concernées, ce qui peut expliquer la croissance du recours aux SIG dans les études réalisées. Toutefois, ces champs disciplinaires présentent des évolutions différentes comme le montre la figure ci-dessous.

Tableau 3 - Évolution du nombre d'articles faisant référence aux SIG dans les disciplines fortement liées aux SIG

	avant	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Total
Sciences de l'agronomie et de la biologie	0	0	0	3	1	10	19	37	29	44	66	55	46	265
Informatique	3	1	6	7	5	4	6	10	6	9	10	13	10	100
Sciences de la terre	4	2	6	10	6	11	23	18	16	23	17	22	28	196
Sciences de l'environnement	4	0	2	19	11	35	45	39	58	67	77	104	74	546
Sciences sociales	23	9	27	40	31	44	46	39	45	39	60	55	75	561

Source : *Science Direct*

Figure 3 - Évolution du nombre d'articles dans les disciplines fortement liées aux SIG



Source : Science Direct

La première remarque qui se dégage de la lecture de cette figure est l'importance des sciences sociales qui, très tôt, ont utilisé les SIG dans leurs études et, jusqu'en 1997, dominent les autres disciplines en terme de nombre de publications impliquant les SIG. Mais très rapidement elles sont rattrapées et dépassées d'abord par les sciences de l'environnement qui surclassent toutes les autres disciplines, mais aussi par les sciences de l'agronomie et de la biologie entre 1999 et 2001. Nous pouvons aussi noter l'importance croissante de l'informatique. Cette discipline est en deçà du seuil des 20 publications annuelles sur toute la période de référence. Mais dès l'année 1995, le nombre de publications annuelles est stable, et permet d'atteindre une moyenne annuelle de dix publications, ce qui est important comparé aux disciplines faiblement utilisatrices des SIG.

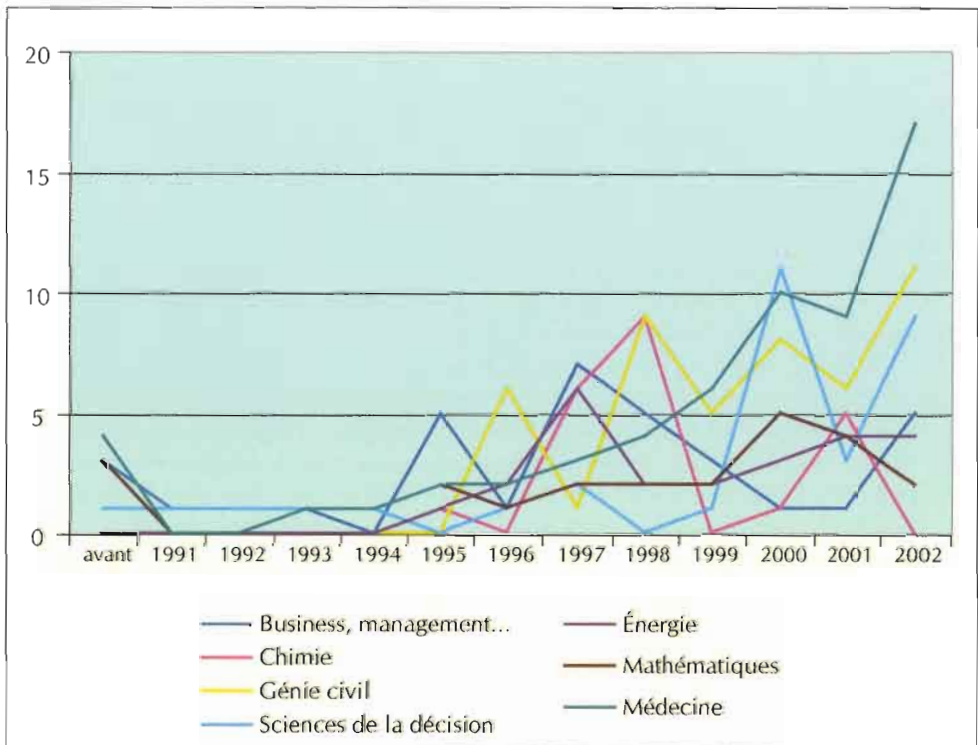
Sur ce graphique sont regroupées les disciplines qui semblent avoir le moins de liens avec le monde des SIG. Il s'agit des disciplines qui ont moins recours à l'espace dans l'approche classique de leurs problématiques. Nous pouvons noter cependant l'utilisation déjà ancienne des SIG par les disciplines liées au Business et au management qui ont largement recours à l'analyse spatiale pour résoudre des problèmes liés à l'optimisation de l'emplacement de magasins, le calcul de zones de chalandise, etc. Même si les SIG apparaissent très tôt dans ce groupe de revues, on peut tout de même noter que leur nombre reste stable (cf. tab. 4). Pourtant, les SIG ont aujourd'hui une vocation commerciale clairement affichée, du moins dans le volet opérationnel de l'outil.

Tableau 4 - Évolution du nombre d'articles faisant référence aux SIG dans les disciplines faiblement liées aux SIG

	avant	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	total
Business, management...	3	1	1	1	0	5	1	7	5	3	1	1	5	33
Chimie	0	0	0	0	0	1	0	6	9	0	1	5	0	22
Génie civil	0	0	0	0	0	0	6	1	9	5	8	6	11	47
Sciences de la décision	1	1	1	1	1	0	1	2	0	1	11	3	9	34
Énergie	0	0	0	0	0	1	2	6	2	2	3	4	4	25
Mathématiques	3	0	0	1	1	2	1	2	2	2	5	4	2	25
Médecine	4	0	0	1	1	2	2	3	4	6	10	9	17	59

Source : Science Direct.

Figure 4 - Évolution du nombre d'articles dans les disciplines faiblement liées aux SIG



Source : Science Direct

Il est aussi primordial de noter la forte progression des SIG, et donc de l'espace, dans les disciplines liées à la médecine. En effet, l'approche épidémiologique, qui de nos jours prend de plus en plus d'importance, nécessite de recouper plusieurs facteurs

d'ordre environnementaux. Les SIG apparaissent donc comme une solution adéquate puisqu'ils permettent de stocker un grand nombre d'informations, et d'exécuter des opérations de recoupements spatiaux. Ce type d'approche est novateur dans ces disciplines qui jusque-là se contentaient d'approches statistiques où l'espace n'était pas forcément pris en compte.

Ces deux analyses, bien que générales, illustrent bien une certaine « démocratisation » de l'outil SIG au sein de nombreux thèmes de recherche. Cette démocratisation est facilitée par la puissance de calcul des ordinateurs, l'amélioration de l'interface informatique des SIG qui ne nécessitent plus d'être un « informaticien » pour entreprendre l'approche spatialisée d'un phénomène. Le recours de plus en plus systématique aux bases de données est aussi un facteur explicatif puisque ce type de stockage de l'information est à la base des SIG qui permettent ensuite un grand nombre d'opérations classiques et de multiples combinaisons spatiales sur les données stockées.

Quelle place pour les SIG dans les disciplines scientifiques ?

Comme nous venons de le voir, la place des SIG dans les revues scientifiques n'est plus à démontrer. Dès 1992, leur utilisation se généralise dans la recherche avec des objectifs plus ou moins précis mais tous centrés autour de la spatialisation des données ou phénomènes. Il peut s'agir d'une simple représentation de ce que l'on étudie (cartographie), ou bien de la modélisation de phénomènes (recherche fondamentale) pour mieux analyser la complexité du monde réel et aider à la prise de décision (aménagement, environnement, suivi et gestion de projets...).

En dépit des évolutions générales constatées, il est difficile de suivre plus en détail ces transformations par les intitulés des noms de revues. Toutefois, on devrait passer de revues plutôt disciplinaires à des revues plus orientées vers une application spécifique des SIG. Dans ce sens, l'évolution serait alors marquée par la transversalité, l'interdisciplinarité et/ou la pluridisciplinarité. Mais du fait que les portails interrogés ne donnent pas d'information sur les revues avant 1990, cette comparaison est quasiment impossible. On peut tout de même classer les revues en quatre grands groupes :

- Les revues environnementales traditionnelles. Ces revues assez anciennes traitent les SIG comme un outil améliorant la spatialisation de leurs études. Elles l'incorporent petit à petit dans leurs lignes éditoriales avec des sujets illustrant l'apport des SIG dans leur problématique de travail. On peut citer pour exemple *Landscape Ecology*, *Biological Conservation*...
- Les revues techniques traditionnelles. Ces dernières traitent non pas d'une thématique de travail, mais d'un outil au service de l'ensemble de la communauté scientifique. Les articles traitent toutes les thématiques de recherche, bien que ces dernières soient souvent environnementales. C'est le cas par exemple de *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *International Journal of Remote Sensing* ou des revues informatiques qui s'intéressent aux SIG car le développement de cet outil passe forcément par des innovations techniques informatiques à développer.

- Les revues spécialisées dans les SIG qui apparaissent plus tard, vers le milieu des années 1990. Les titres de ces dernières affichent une spécialisation de leur ligne éditoriale avec un outil (les SIG ou du moins la spatialisation des phénomènes) au service d'une problématique scientifique ciblée. C'est le cas par exemple de *Advances in Spatial databases, Earth Observation and remote sensing, Environmental Modelling and Software, International Journal of Geographical Information Science...*
- Les revues dont les SIG apparaissent en marge de leurs préoccupations. Avec des articles peu fréquents qui illustrent une étude de cas où on utilise le SIG ou du moins la spatialisation d'un phénomène pour mieux le comprendre. C'est le cas par exemple de *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Journal of Raptor Research...*

Ces exemples illustrent la part de plus en plus importante donnée à l'information spatiale dans les recherches. Il est de plus en plus fréquent de noter l'apparition des SIG dans des revues qui ne semblent pas de prime à bord utilisatrices des approches liées aux SIG. Mais on a vu que les sciences sociales se sont toujours intéressées à cet outil avec une constante progression du nombre d'articles utilisant les SIG. L'apparition dès le milieu des années quatre-vingt-dix, mais surtout à partir de 1997, de nombreuses revues spécialisées sur un thème de recherche précis donnant une part importante aux SIG ou du moins à la spatialisation des études, conforte l'importance des SIG dans la recherche. L'espace étant le support de la plupart des problèmes modernes, sa prise en compte dans l'étude scientifique d'un phénomène devient incontournable. Elle s'illustre par le rôle grandissant accordé aux SIG qui permettent de modéliser des phénomènes spatiaux. Les SIG ne sont plus perçus comme de simples logiciels de cartographie, mais comme de véritables outils incontournables pour traiter et gérer des phénomènes très complexes.

En guise de conclusion

Les SIG sont d'usage de plus en plus courant dans les recherches scientifiques. Ils sont fréquemment cités en référence dans de nombreuses publications. Du simple rôle d'instruments, ils tendent à s'ériger en discipline ; alors, SIG : outils ou concepts ? Si le concept est la « représentation intellectuelle d'un objet conçu par l'esprit » et l'outil « un élément d'une activité qui n'est qu'un moyen, un instrument » (Larousse), alors il est légitime de s'interroger sur la dénomination des SIG comme concepts ou outils. Au stade actuel de la réflexion, il n'est sans doute pas possible de répondre à une telle interrogation, tout au moins de manière définitive. Tels que définis précédemment, les SIG constituent une technologie synergique et multi-disciplinaire. Leur donner une définition unique serait malaisé tant le terme peut paraître ambivalent entre système, science, informatique et géographie. Toutefois, les SIG sont d'abord des outils qui prennent autant de définitions que de logiciels, d'applications ou d'utilisateurs. Cependant, en faisant appel à de nombreuses disciplines qui y recourent de plus en plus fréquemment, les SIG évoluent progressivement vers des concepts au cœur des sciences de l'information géographique. Quoiqu'il en soit, les SIG sont des technologies intégratives qui peuvent être assimilées à un réceptacle qui reçoit et stocke diverses données

que les opérateurs traitent et restituent, soit pour mener des analyses ultérieures, soit pour mettre en forme des résultats de traitements réalisés en fonction d'objectifs spécifiques. Longtemps réservés aux domaines de la gestion et des applications associées, les SIG ont progressivement investi les milieux plus académiques de la recherche et des universités. Dans le domaine de la recherche scientifique, les SIG ont d'abord été tout naturellement appropriés par les champs de recherche appliquée (aménagement, analyse spatiale, cartographie, environnement...). Puis, ils ont investi les champs des recherches fondamentales auxquelles ils offrent de nouvelles perspectives méthodologiques. Une « culture SIG » se répand dans les domaines scientifiques concernés, en relation avec les formations et la formation à la recherche offertes par les universités. Chez les Anglo-Saxons, il se développe depuis une dizaine d'années, un pan de recherches à caractère méthodologique sur la mise en œuvre des SIG dans les problématiques de recherches scientifiques (Zaninetti, 2004). Finalement, les SIG sont une sorte de « tour de contrôle » à la croisée de plusieurs disciplines auxquelles ils assurent une certaine cohérence méthodologique et la rigueur du raisonnement scientifique : « les Systèmes d'information géographique font maintenant partie des outils, certains diraient des concepts, d'utilisation fréquente dans l'ensemble des domaines géant, analysant et orientant nos territoires et leur devenir » (Cheyland, 1997). Les SIG comme concepts, évoluent avec les recherches en informatique, appliquées à l'interface développement/utilisateur. D'où les tendances actuelles de l'*Open Source* (OpenGIS) où les fonctionnalités et les capacités d'analyse sont définies en fonction des besoins réels et particuliers. D'où aussi des approches orientées objets qui font évoluer le concept. En revanche, c'est la nature « outil » des SIG qui intervient dans les recherches en sciences sociales, en gestion, en environnement, etc., sans que la question du concept ne soit forcément abordée par les recherches en cours dans ces domaines. Toutefois, pour qu'un SIG soit d'un bon usage dans le cadre d'une recherche scientifique, il faut que l'équipe/chercheur ait une culture poussée en SIG et manipulation des données géoréférencées. À la lecture des articles rassemblés dans cet ouvrage, le monde des SIG se révèle être un continuum des applications méthodologiques et thématiques à finalité opérationnelle allant de la géographie à l'archéologie en passant par l'environnement, l'hydrologie, l'agronomie, la climatologie, l'histoire et la cartographie.

Bibliographie

- ARRONOF S. *Geographic information system, a management perspective*, Ottawa, WDL publications, 1989, 294 p.
- BERNARD J-L., ESSEVAZ-ROULET M. *Mise en œuvre d'un SIG*, Ed. La lettre du cadre territorial, 1995, 145 p.
- BERTHELOT, J.M. *Épistémologie des sciences sociales*, Paris, PUF, 2001, 593 p.
- BRACKEN I., WEBSTER C. *Information Technology in Geography and planning, Including Principles of GIS*, London, Ed. Rutledge, 1990, 444 p.
- BRUNET R. FERRAS R., THERY H. *Les mots de la géographie. Dictionnaire critique*. Collection Dynamiques du territoire, Reclus – La Documentation française. Paris, 1992, 470 p.
- BRUNSDON C F, CARVER C J, 1989, "Vector to raster conversion error and feature complexity an empirical study using simulated data", IJGIS, vol. 8, n°3.

- BUCHE P., KING D., LARDON S. *Gestion de l'espace rural et Système d'information géographique*, Séminaire INRA, Florac 22-24 octobre 1991, 421 p.
- BURROUGH P. A., MC DONNELL R.A. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford University Press, USA, 1999. 344 p.
- CHEYLAND J-P. *SIG et cartographie*, CFC n° 151-152, Mars-Juin 1997, p. 22-34.
- CNIG *Les Systèmes d'information géographiques à grande échelle*. Actes du séminaire CNIG-AF13G, 22-23 novembre 1989, 255 p.
- DANA TOMLIN C. *Geographic information system and cartographic modelling*, New Jersey, Prentice Hall, 1990, 249 p.
- De BLOMAC F., GAL R., HUBERT M., RICHARD D., TOURET C. *ARC/INFO, concepts et application en géomatique*. Ed. Hermès, Paris, 1994, 248 p.
- DENEGRE J., SALGE F. *Les Systèmes d'information géographique*. Ed. Presses Universitaires de France, Que-sais-je ? n° 3122, Paris, 1996, 128 p.
- DICKINSON H J, CALKINS H W, 1988, "The economic evaluation of implementing a GIS", *IJGIS*, vol. 7, n°4.
- DIDIER M. *Utilité et valeur de l'information géographique*, Paris, Ed. Economica, 1990, 255 p.
- DIDIER M., BOUVEYRON C. *Guide économique et méthodologique des SIG*. Paris : Hermès, 1993.
- DUEKER K J, 1979, *An information systems strategy for urban and regional planning: Venezuela*, University of Iowa: Institute of Urban and Regional Research.
- ECOBICHON C. *L'information géographique : nouvelles techniques, nouvelles pratiques*. Hermes, Paris, 1994, 122 p.
- FORTHERINGHAM S., ROGERSON P. *Spatial analysis and GIS*. Ed. Taylor & Francis, London, 1994, 281 p.
- FRASER TAYLOR D.R. *Geographic information systems, the microcomputer and modern cartography*, Oxford, Pergamon Press, 1991, 251 p.
- GOODCHILD M F, 1994, "GIS and geographic research" In John Pickles, editor, *Ground Truth: The Social Implications of Geographic Information Systems*, New York: Guilford.
- HAINING R. *Spatial data Analysis in the Social and Environmental Sciences*. Cambridge University Press, 2nd edition revised, 1993, 432 p.
- MAGUIRE J.D., GOODCHILD F., RHIND W.D. *Geographical information systems*, Essex (GB), Longman Scientific & Technical, 1991. Volume 1: Principles, 649 p., Volume 2 : Applications, 447 p.
- MARTIN D. *Geographic information systems and their socioeconomics applications*, London, Rutledge, 1991, 182 p.
- MASSER I., BLAKEMORE M. *Handling geographical information, methodology and potential applications*, Essex (GB), Longman Scientific and Technical, 1991, 317 p.
- MINVIELLE E., SIOUAH S.A. *L'analyse statistique et spatiale: statistiques, cartographie, télédétection, SIG*. Nantes : Edition du temps, 2003, 284 p.
- PANTAZIS D., DONNAY J.P. *La conception de SIG*, Ed. Hermès, Paris, 1996, 343 p.
- PAZNER M, 1989, "Map 2, map processor: reference", In *Tutorial Map 2*, Kirby K C, Pazner M, Thies N, Toronto: John Wile & Sons.
- PICKLES J., éd. *The Social Implications of Geographic Information Systems*. New-York, The

Guilford Press. 1995, 248 p.

PORNON H. *Les SIG., Mise en œuvre et applications*, Paris, Hermès, 1992, 158 p.

ROCHE S. *Les enjeux sociaux des SIG, le cas de la France et du Québec*, Ed. L'Harmattan, Paris, 2000, 157 p.

WANIEZ P., VIZINTIM M. ET BRUSTLEIN V. *Pour l'expérimentation des SIG en géographie, le SIC Paraná*. Mappemonde (3/93): 1993, P. 29-34

ZANINETTI J-M. *Apport de l'analyse spatiale à la géographie*, Habilitation à diriger les recherches, Université de Paris-Sorbone (Paris IV), 2004, 502 p.

Annexe 1 : Revues de la base de donnée Web Of Sciences dont le titre contient le terme « geograph* »

(en gras les revues ayant une spécialisation en géographie humaine).

Acta geographica

Acta geographica-france

Annales de géographie

Annals of the Association of American Geographers

Applied Geography

Australian Geographer

Australian Geographical Studies

Bulletin de l'académie polonaise des sciences - Série des sciences géologiques et géographiques

Canadian Geographer

Canadian Geographer-Géographe canadien

Cartography and Geographic Information Systems

Economic Geography

Geografiska Annaler Series A-Physical Geography

Geografiska Annaler Series B-Human Geography

Geographical Analysis

Geographical Journal

Geographical Review

Géographie physique et quaternaire

Geographische Zeitschrift

Geography

Global Ecology and Biogeography

Global Ecology and Biogeography Letters

Global Environmental Change-> Human and Policy Dimensions

International Journal of Geographical Information Science

International Journal of Geographical Information Systems

Interoperating Geographic Information Systems

Journal of Biogeography

Journal of Geography

Journal of Geography in Higher Education

Journal of Historical Geography

Journal of Tropical Geography

National Geographic

National Geographic Research

Occasional papers in Geography-University of Hull

Physical Geography

Political Geography

Political Geography Quarterly

Post-soviet Geography

Post-soviet Geography and Economics

Professional Geographer

Progress in Human Geography

Progress in Physical Geography

Revue de géographie physique et de géologie dynamique

Revue de géologie dynamique et de géographie physique

Scottish Geographical Journal

Scottish Geographical Magazine

Singapore Journal of Tropical Geography

**Social Science & Medicine Part D - Medical
Geography**

Soviet Geography

Soviet Geography Review and Translation

Transactions of the Institute of British
Geographers

Tropical and Geographical Medicine

Urban Geography.

Les SIG dans la recherche française en géographie

Bilan et questions

Thierry JOLIVEAU, UMR CRENAM, Université Jean Monnet, France
Thierry.Joliveau@univ-st-etienne.fr

Résumé : Quelle place et quel rôle ont tenu les SIG dans la recherche en géographie, depuis leur émergence, il y a une quinzaine d'années ? On dispose maintenant d'un peu de recul pour tenter une réponse étayée. Une première partie tente un bilan quantitatif de l'utilisation des SIG en géographie à partir du Répertoire des géographes et d'une étude bibliométrique des thèses de géographie et des articles parus dans des revues géographiques françaises. Un deuxième bilan porte sur les manières dont les SIG sont perçus et utilisés dans les recherches qui intéressent les géographes à partir d'une analyse systématique d'un corpus d'articles et de communications. Enfin, la dernière partie analyse rapidement les arguments avancés à propos de l'utilisation des SIG en retraçant les principaux éléments des débats dans la géographie française et anglo-saxonne. En conclusion, on s'interroge sur les conséquences de l'intérêt mitigé que semblent porter actuellement la majorité des géographes français à ces outils.

Mots clés : SIG – Géographie – Géomatique - épistémologie

GIS in French research in geography Assessment and questions

Abstract: Which place and which role did GIS have in geography research since their emergence, about fifteen years ago? One now has a little background to try and support an answer. A first part attempts a quantitative assessment of the use of GIS in geography starting from the Directory of geographers and of a bibliometric study of the doctorates in geography and articles published in French geographical reviews. A second assessment relates to the ways in which GIS are perceived and used in research which interests geographers starting from a systematic analysis of a set of articles and communications. Finally, the last part quickly analyzes the proposed arguments in connection with the use of GIS by recalling the main elements of the debates in French and Anglo-Saxon geography. As a conclusion, one wonders about the consequences of the mitigated interest which seem to currently carry the majority of French geographers to these tools.

Key words : GIS, Geography, Geomatic, Epistemology

Introduction : une appellation trompeuse

L'intitulé même des SIG fait débat ou peut conduire à de fausses évidences. Le G des SIG a longtemps gêné aux entournures les informaticiens ou les spécialistes d'autres disciplines qui y percevaient une captation illégitime de ces outils par une des nombreuses disciplines intéressées à son développement. La promotion du terme de

SIRS (Système d'information à référence spatiale) peut se comprendre aussi a posteriori comme une manière de lever cette ambiguïté. Inversement, le nom a peut-être participé à entretenir une fausse image de ces outils de la part des géographes, qui ont eu tendance à les percevoir comme naturellement géographiques et susceptibles de s'intégrer sans problème dans une pratique géographique inchangée. L'hypothèse de cette communication est que la relation entre SIG et géographie n'est pas aussi évidente qu'elle en a l'air et que l'utilisation des SIG en géographie pose des questions (certaines nouvelles, d'autres qui sont la réactivation de questions plus anciennes), dont il est nécessaire de discuter si l'on souhaite améliorer à la fois l'utilisation des SIG par les géographes et l'analyse géographique que l'on peut faire avec ces outils. Ce n'est qu'au prix de ce débat que l'on pourra éviter que ne se distendent, comme on le pressent, les relations entre des géomaticiens sûrs de l'efficacité de leurs techniques, entées qu'elles sont sur un secteur économique florissant et une reconnaissance sociale grandissante, et des géographes hostiles ou indifférents à ces outils et inquiets d'une dérive technique et acritique de la géographie.

Le sujet posé est bien entendu trop vaste pour être épuisé dans le format de ce texte. Il n'est pas non plus réaliste de prétendre régler la question en même temps qu'on l'ouvre et c'est comme une contribution à un tel débat qu'il faut comprendre ce qui suit. Pour éviter de discuter du sexe des anges et d'échanger des procès d'intention, il nous a paru nécessaire de proposer un certain nombre d'éléments plus ou moins factuels et objectifs sur l'utilisation des SIG dans la recherche géographique française¹, avant de faire part de réflexions à caractère général.

Levons d'abord une interrogation sur la légitimité de l'approche. Alors que tout le monde est d'accord pour reconnaître que les SIG sont très efficaces dans un travail collectif et interdisciplinaire, n'est-ce pas adopter un point de vue frileux et étriqué que d'interroger leur place dans la recherche des seuls géographes ? Une bonne interdisciplinarité se conçoit à notre sens quand les chercheurs sont pleinement conscients des caractéristiques, contraintes et richesses de leur propre approche disciplinaire. C'est parce que l'on est à l'aise comme géographe que l'on peut être utile dans une équipe de recherche multidisciplinaire. Le fait que les outils SIG soient mis en œuvre dans un contexte où des spécialistes de différents horizons coopèrent devrait justement conduire les géographes à mieux définir la place de ces outils dans leur propre pratique de recherche. Se focaliser sur la communauté des géographes ne doit donc pas apparaître comme une volonté d'exclusion et de repli, mais plutôt de renforcement d'une conscience disciplinaire pour être plus utile dans un contexte d'ouverture pluridisciplinaire.

¹ Que nos amis québécois, suisses et belges nous pardonnent, cette première analyse prend comme référence non la géographie francophone, mais française. Il serait nécessaire de compléter cette approche ; les recherches géomaticques belges, suisses et québécoises sont nombreuses et importantes. Le Québec, vu sa situation nord-américaine, joue un rôle de passeur original qui nécessiterait de plus une étude spécifique.

Éléments pour un bilan

Même si l'histoire de la recherche sur les SIG en France est courte, une reconstitution minutieuse de sa préhistoire serait intéressante et permettrait vraisemblablement de comprendre une partie des enjeux actuels qui y sont liés. L'histoire plus ancienne et complexe des SIG outre-atlantique fait d'ailleurs l'objet actuellement d'un intense travail de recherche. Si le mot et la chose *Geographical Information Systems* (GIS) datent du début des années soixante, la première référence bibliographique que nous avons trouvée dans la géographie française, publiée d'ailleurs dans une revue québécoise, n'est que de peu postérieure aux travaux anglo-saxons. L'article de Rimbert et Lengellé (1969) présente sous le nom de *Geo-Coding System* quelque chose qui a toutes les caractéristiques d'un SIG et renvoie explicitement aux premières applications du « *Geo-Information System of the Canada Land Inventory* » de Tomlinson.

Établir un bilan quantitatif des recherches géographiques françaises sur ou avec des SIG nécessite de trouver des sources d'information régulières et de définir le type de travaux que l'on entend prendre en compte. Il nous semble que ceux-ci sont de deux types. Il y a d'abord les travaux des géographes menés sur les SIG dans un contexte pluridisciplinaire, qui touchent prioritairement, et même parfois exclusivement, un public de non géographes. Il y a aussi les recherches produites ou non par des géographes qui empruntent les canaux (revues, colloques, rencontres...) familiers de la communauté des géographes et qui sont donc visibles par ces derniers. Ce sont les deux versants d'un même sommet. Nous nous attaquons dans ce papier exclusivement au second. Notre objectif est donc d'analyser la recherche sur les SIG dont les résultats sont facilement accessibles aux géographes. Nous laissons de côté (momentanément et sans dénigrer leur intérêt, bien au contraire) les travaux du premier type, en particulier ceux menés depuis 1989 dans le cadre du groupe Cassini ou publiés dans la *Revue internationale de géomatique*, qui nous semblent participer d'une autre logique et exiger une analyse spécifique. Le bilan quantitatif que nous proposons est fondé sur des sources non absentes de biais, mais dans lesquelles ces derniers peuvent être considérés comme plus ou moins invariants : le Répertoire des géographes, édité par le laboratoire Intergéo puis Prodige, le fichier des thèses et un corpus d'articles parus dans des revues de géographie collectés à cet effet.

Quand les géographes se répertorient

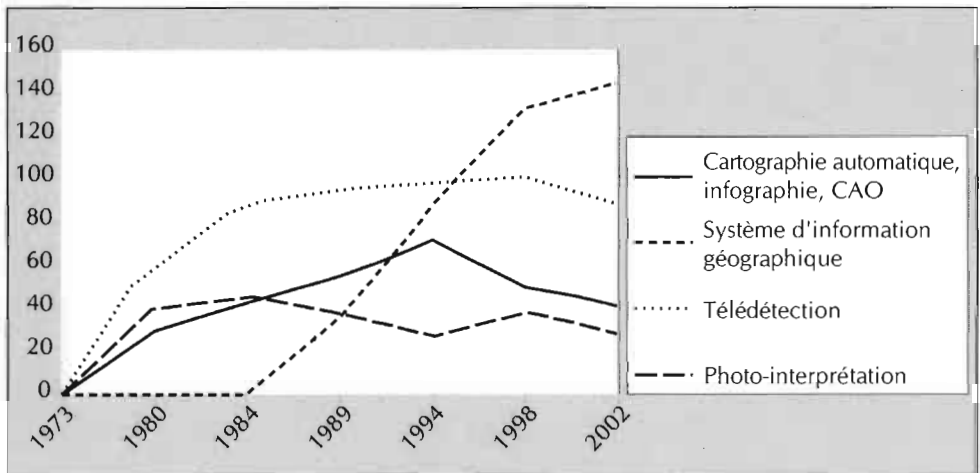
Les Répertoires des géographes publiés assez régulièrement depuis 1969 (Joly, 2002) sont une source intéressante pour notre approche (Matoux-Lambert, 1993). Les géographes sont en effet régulièrement invités à décrire leur activité sous forme de mots clés et il est possible à travers cette source de pointer les thèmes mobilisateurs ou délaissés. Le Répertoire présente un certain nombre de biais, sur lesquels nous ne reviendrons ici que brièvement. D'abord tous les géographes ne remplissent pas de fiche dans le Répertoire. En cas de non réponse, la fiche de l'édition précédente, si elle existe, est maintenue. Par ailleurs, le Répertoire ne regroupe pas que les géographes du monde de la recherche, même s'ils y sont très largement majoritaires. De plus, les mots clés sont à sélectionner dans une liste pré-établie, qui évolue au cours du temps :

le Répertoire peut donc parfois saisir les innovations avec retard. Enfin, déclarer un mot-clé n'est pas toujours le signe d'un travail de recherche effectif dans le domaine considéré ; il existe un effet mode dans les déclarations, qui n'est d'ailleurs pas inintéressant d'étudier.

La diffusion des SIG chez les géographes français

Le terme SIG apparaît dans la liste fournie par les auteurs du Répertoire en 1989, qui correspond donc à l'année de reconnaissance officielle des SIG comme objet et moyen de recherche². Une rapide vérification montre qu'en 1984 aucun géographe n'avait déclaré SIG parmi les mot-clés qu'il a le loisir d'ajouter à ceux proposés. Or près de la moitié de ceux qui déclarent en 1989 le thème SIG déclarent aussi le thème « cartographie automatique », proposé depuis 1980 dans le Répertoire. C'est donc entre 1984 et 1989 et très nettement dans l'orbite de la cartographie automatique que le terme fait irruption dans la communauté des géographes. Il y connaît rapidement un vif succès, comme le montre la figure 1³.

Figure 1 - Nombre de citations de différents mots clés dans les Répertoires des géographes



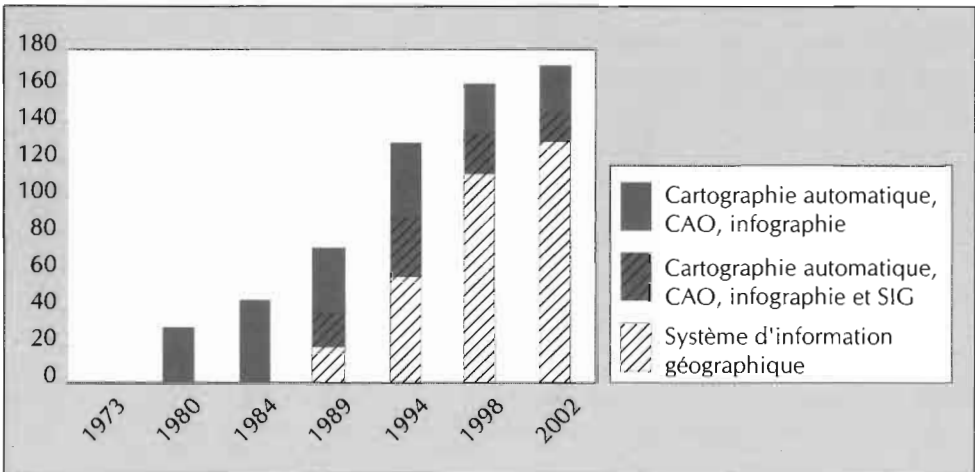
La croissance est régulière de 1989 à 1998, et s'infléchit légèrement ensuite. On passe ainsi de 37 géographes répertoriés à 146 dans la dernière édition en 2002. La diffusion est donc rapide. En comparant la courbe à celle d'autres thèmes méthodologiques tels que cartographie automatique et infographie ou télédétection, on constate un décalage d'une dizaine d'années, avec une pente plus forte et des valeurs absolues plus élevées. Alors que le mot-clé télédétection culmine à 99 géographes en 1998, 25 ans après son apparition, et la cartographie automatique à 72 en 1994,

² D'autres indicateurs plus qualitatifs nous montrent que 1989 est en effet l'année charnière qui marque l'émergence des SIG dans la recherche en France.

³ Merci à Carole Bessenay, Faculté SHS - Université de Saint-Etienne, pour la mise en forme définitive des graphiques.

les SIG concernent presque 150 notices du dernier Répertoire, moins de 15 ans après son émergence. En valeur relative, l'effet est moins évident. En effet, le nombre de notices de géographes s'élève au cours du temps (de 1300 en 1989 à près de 2000 en 2002). En 1984, juste avant le lancement du satellite SPOT, 8,3 % des géographes déclaraient s'intéresser à la télédétection. Les SIG n'atteignent que 7,2 % en 2002. Les géographes officiellement "convertis" aux SIG pour leurs travaux de recherche restent très minoritaires en 2002. L'inflexion de la courbe est-elle le premier signe d'un fléchissement à venir ? Il est trop tôt pour le dire mais la forme des courbes des autres thèmes méthodologiques peut laisser augurer une croissance continuant à vitesse plus lente pendant plusieurs années suivie d'un plafonnement à un nombre relativement élevé de pratiquants.

Figure 2 - Les mots clés «Cartographie automatique» et «SIG» dans le Répertoire des géographes

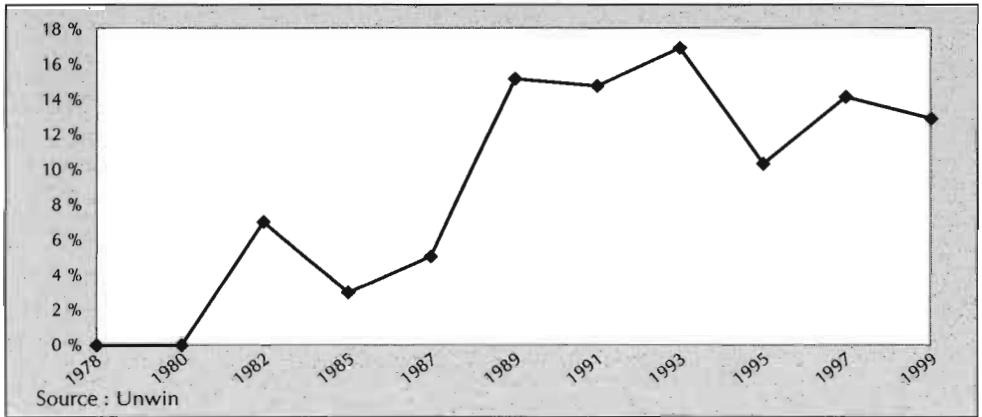


L'origine thématique des SIG

Qui sont les géographes qui s'intéressent aux SIG ? Dans l'attente des résultats d'une analyse individuelle, on peut constater d'abord que le mot-clé SIG grignote régulièrement le mot-clé cartographie automatique au cours du temps, sans l'annihiler cependant. À la fin de la période, plus de la moitié des géographes spécialisés en cartographie automatique associent les SIG à leurs thématiques (fig. 2). Les SIG constituent donc au début, au moins pour partie, un nouveau nom des recherches de cartographie automatique. Cependant, on constate que le thème cartographie automatique continue à croître jusqu'en 1994, avant de baisser ensuite. Il conserve toutes ces années un nombre d'adeptes qui résistent aux SIG. Si ces derniers trouvent donc vraisemblablement une origine dans les travaux de la cartographie automatique et de l'infographie des années quatre-vingts, ils ont une dynamique propre, qu'illustre le fait que les géographes mentionnant les SIG et pas la cartographie automatique, deviennent rapidement les plus nombreux.

Une autre source nous permet de repérer une seconde origine thématique des SIG : l'analyse rétrospective de l'activité de l'*European Colloquium in Quantitative and Theoretical Geography* (ECQTG) que fait Unwin (1999). La référence à l'ECQTG n'est pas déplacée dans une analyse portant sur les géographes français. Ce sont des rencontres auxquelles ils sont fidèles (c'est souvent la nationalité la mieux représentée, bon an mal an entre 15 et 30 % des participants). Comme le montre la figure 3, le thème des SIG n'apparaît pas avant 1980 dans ces colloques et occupe une place relativement faible dans les rencontres des géographes quantitatifs européens jusqu'en 1989. Alors que ces colloques se sont tenus 21 fois entre 1978 et 1999, 10 % du total des papiers se réfèrent à la thématique SIG.

Figure 3 - Pourcentage des communications sur le thème des SIG aux colloques ECQTG



La répartition chronologique montre une apparition du thème en 1983, une stagnation relative jusqu'en 1989, un boom entre 1989 et 1993 et une stabilité à un niveau légèrement plus bas (14 % des papiers) depuis cette date. La relative stabilité qui suit peut s'expliquer selon Unwin, par le fait que ce type de colloque n'est pas le lieu le plus direct des publications SIG. On peut donc faire l'hypothèse qu'en 1989 les SIG sortent des laboratoires d'informatique et de géographie « quantitative » et se diffusent à l'ensemble de la géographie. L'apparition de l'intitulé GIS dès 1983 au colloque d'Augsbourg témoignerait donc d'une antériorité « quantitativiste » des SIG dans la recherche en géographie.

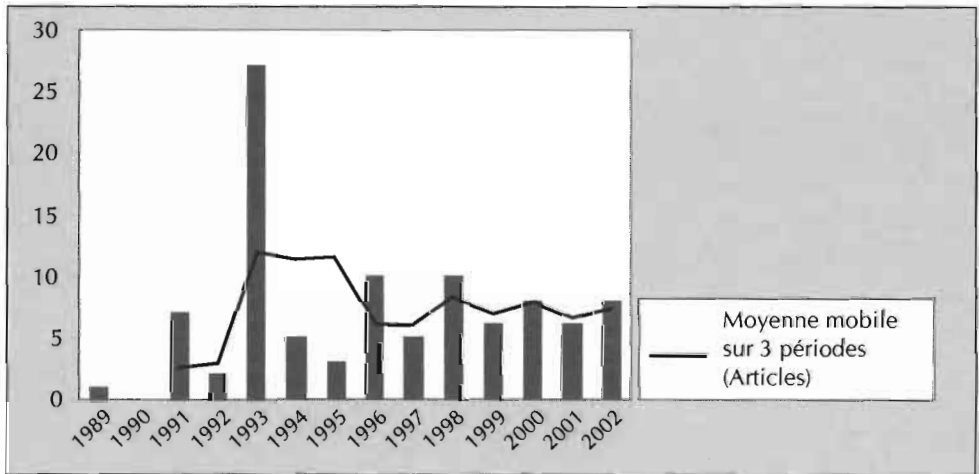
Un bilan bibliométrique

Les articles scientifiques

Le bilan sur les articles de géographie concernant les SIG ou la géomatique que nous proposons ici n'est pas fondé sur une recension exhaustive. Nous avons retenu un panel de 5 revues, choisies en diversifiant le type de comité de rédaction (national

ou régional), l'orientation plus ou moins moderniste ou traditionnelle et le mode de diffusion (édition papier ou internet) : l'Espace géographique, les Annales de géographie, La Revue de géographie de Lyon RGL-Géocarrefour, Mappemonde et Cybergéo. On peut noter qu'il s'agit de revues généralistes et qu'aucune revue spécialisée (en géographie physique par exemple) n'est retenue. La sélection des articles dans le corpus se fonde sur la mention du mot-clé SIG ou géomatique (en fait, ce dernier n'apparaît pas). Même si leur contenu aurait pu conduire à les sélectionner, nous avons exclu les articles dans lesquels l'auteur ne mentionnait pas SIG comme mot-clé. De même, nous n'avons pas retenu les types de texte non munis d'un indexage par mots clés, comme par exemple les notes des Annales de géographie. La recension a eu lieu à partir des tables récapitulatives par mots clés quand elles existaient. Les (rares) oublis constatés ont été corrigés. On a compté 95 articles ou textes portant le mot-clé SIG entre 1989 et 2002 : 11 dans l'Espace géographique, 2 dans les Annales de géographie, 13 dans RGL-Géocarrefour, 49 dans Mappemonde et 20 dans Cybergéo.

Figure 4 - Nombre d'articles dans des revues de géographie portant le mot-clé SIG



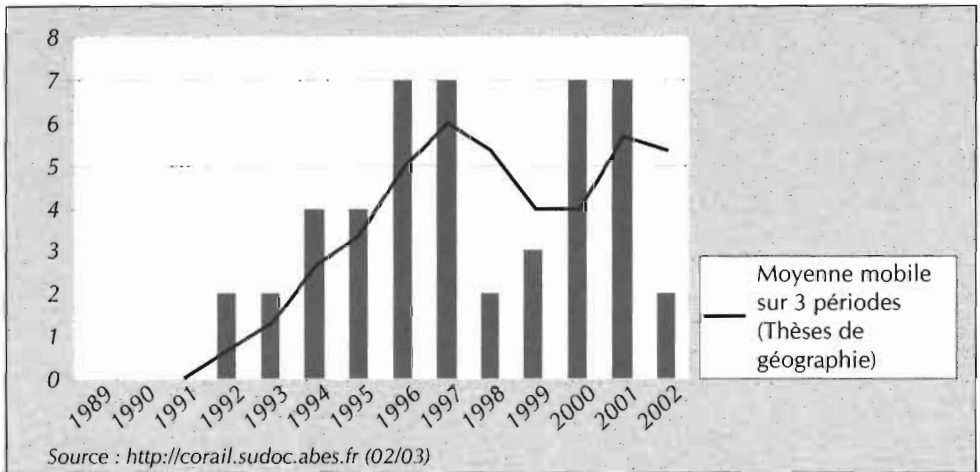
On constate (fig. 4) que les articles pionniers apparaissent en 1989, avec un pic très fort en 1993 et un pallier de 6 ou 7 articles par an ensuite. Certains chiffres sont cependant en trompe-l'œil. Pour la RGL (en 96) et Mappemonde (en 93), un seul numéro spécial contribue pour presque la moitié de la production d'articles de la revue. Par ailleurs, les articles du numéro spécial de Mappemonde 4/93 sont très nombreux mais très courts, ne dépassant pas deux pages. On constate un intérêt pour le thème des SIG très variable selon les revues. Les Annales de géographie par exemple ont complètement ignoré le thème jusqu'à la fin 2002. Certaines années Cybergéo et Mappemonde représentent à elles deux la totalité des articles édités sur ce thème, et chaque année au moins la moitié. 10 % des articles de ces deux revues portent le mot-clé SIG sur la période, alors que les 95 articles SIG correspondent approximativement à 5 % de la production totale des 5 revues entre 1989 et 2002. Ce sont donc les revues les plus récentes : Mappemonde (fondée en 1986) et Cybergéo (fondée en 1992), qui sont les

vecteurs les plus actifs du thème des SIG en géographie. Plus jeunes, elles se révèlent aussi plus ouvertes à un thème émergent.

Les thèses

Un autre indicateur est le nombre de thèses soutenues (fig. 5). On a pris comme source le site web sudoc en sélectionnant les documents de type thèse de géographie, dont n'importe quel mot de la notice est SIG ou Système d'Information Géographique. On obtient 55 réponses (notons que les thèses de géographies sont minoritaires parmi les 125 thèses mentionnant les SIG). On constate une croissance régulière des thèses de 1991 à 1997, suivie d'un creux marqué en 98-99 et une reprise ensuite à un rythme de 7 thèses par an. La valeur de 2002 est incomplète, le fichier n'étant certainement pas à jour à la date de consultation. On ne constate donc pas de baisse récente après le creux. Mais la courbe semble décalée de trois ans par rapport à celle des articles, ce qui correspond au temps de gestation minimal d'une thèse.

Figure 5 - Thèses de géographie soutenues mentionnant le mot SIG



Il faudrait s'intéresser à d'autres sources : les livres, les séminaires, les manuels spécialisés, les encyclopédies de la géographie mais la place manque. Il faudrait surtout procéder à une analyse qualitative de ces documents peu nombreux. Il n'existe pas de livre ou de manuel consacré spécifiquement aux SIG à l'attention des géographes. Et les colloques sont rares. Si l'on écarte les rencontres de Cassini, ou celles de SIGEO qui les précédaient, par essence pluridisciplinaires, et les quelques colloques de géographie et cartographie où ont été abordés accessoirement les SIG, le seul où ils furent le thème central semble être celui de Géopoint en 1994. Organisé par le groupe Dupont en pleine montée de la vague des SIG, le colloque qui portait sur « SIG, analyse spatiale et aménagement » a regroupé 137 participants, partagés entre 7 ateliers (Groupe DUPONT, 1994). Là encore, une fois passée cette période d'innovation, le thème des SIG n'a plus donné lieu à la tenue d'un colloque spécifique à la géographie.

Commentaire

Ces indicateurs convergent pour indiquer une émergence rapide du thème SIG dans la recherche géographique à partir de 1989 avec un ralentissement ensuite, mais qui selon les indicateurs se produit en 1993, 1996 ou plus récemment. Un socle stable de travaux se maintient une fois que s'atténue l'effet nouveauté. Toutefois, la croissance de la production de travaux scientifiques n'est pas proportionnelle à celle du nombre de géographes qui se déclarent actifs sur ce thème. Une explication pourrait être que les SIG sont moins utilisés en géographie dans le domaine de la recherche que dans celui des études appliquées ou des travaux de gestion environnementale et d'aménagement, qui donnent plus rarement lieu à des publications scientifiques. Le pic suivi d'une baisse peut lui s'interpréter de deux manières différentes. L'explication la plus simple est celle de l'effet de mode. Une fois celui-ci évanoui, il ne reste dans les publications que les recherches de fond. On peut aussi l'expliquer par une banalisation de l'usage des outils SIG dans le même temps qu'ils se diffusent. Le mot-clé SIG perdrait son intérêt comme mot-clé d'un article car il n'est plus le marqueur d'une innovation méthodologique. Le SIG deviendrait-il transparent, comme on le verra plus loin ?

Un bilan thématique

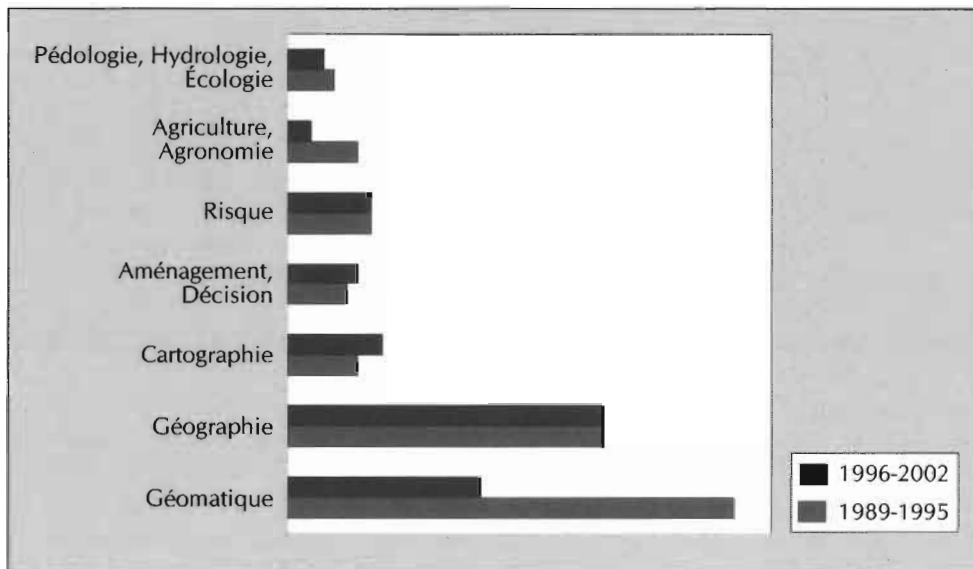
De quoi parlent les articles de recherche indexés SIG accessibles aux géographes non spécialistes ? Nous avons voulu dépasser un simple bilan quantitatif, en analysant les champs thématiques abordés dans le corpus d'articles rassemblé. Celui-ci se compose donc des articles estampillés du mot-clé SIG parus dans les 5 revues citées plus haut, auxquels on a ajouté les communications à Géopoint 94. Le corpus est donc de 132 références, écrites par 200 auteurs (doublons compris).

Pour analyser ces articles, nous proposons quatre descripteurs : le(s) domaine(s) disciplinaire(s) de l'article, la ou les finalités de la recherche relatée, le point de vue adopté sur les SIG et les dimensions méthodologiques des SIG abordés. Chaque article a été lu et un ou plusieurs mots clés pour chaque descripteur lui a été associé. Même s'il a été réalisé avec le plus de soin possible, le descriptif reste subjectif et reflète le jugement de l'auteur⁴. Par ailleurs, on l'a déjà dit, le corpus est hétérogène. Il est dominé en nombre par le numéro spécial de Mappemonde de 1993 et les communications du colloque Géopoint de 1994 qui se caractérisent par leur brièveté. Regroupant plus de 40 % des textes, ces deux documents totalisent moins de 30 % des pages produites.

Ces limites énoncées, il nous semble intéressant cependant de repérer le poids relatif des intérêts thématiques et, éventuellement, de leur évolution dans le temps. Pour simplifier l'analyse, nous avons distingué deux périodes : avant 1996, période de jeunesse des SIG dans la recherche en géographie en France sont parus 60 % des articles et 40 % après 1996, qu'on pourrait appeler l'ère de maturité.

⁴ qui est juge et partie, puisque certains de ses articles font partie du corpus.

Figure 6 - Nombre d'articles SIG par grands domaines disciplinaires



Les grands domaines d'application

On peut d'abord faire une distinction entre les articles dont le SIG est l'objet de l'exposé et ceux pour lesquels il apparaît plus comme le moyen d'une autre fin. Dans le corpus qui nous intéresse, le deuxième type de posture devrait être dominant, puisque la réflexion portant sur l'objet SIG en lui-même relève plus directement des revues de géomatique. Ensuite, on peut distinguer les articles relevant d'une approche explicitement géographique de ceux relevant plutôt d'autres disciplines ou démarches. Un article peut appartenir à plusieurs catégories. Ce qui frappe dans la figure 7 c'est la permanence des structures au cours du temps, à l'exception de la baisse très significative après 1996 des articles que l'on a appelés géomatiques, c'est-à-dire dont la problématique porte sur le SIG pour lui-même. C'est la baisse de ce type d'articles qui explique la baisse générale constatée. Une fois passée la période de découverte des SIG, il semble que ce soient les applications qui intéressent prioritairement les géographes.

La figure 6 récapitule la répartition thématique à l'intérieur du grand domaine Géographie et illustre la diversité des approches géographiques qui utilisent les SIG. Le terme géo-modélisation caractérise les articles dont l'intérêt pour les méthodes et techniques de modélisation spatiale au sens large est manifestement fort, qu'un domaine d'application soit ou non mentionné. Ce tableau confirme aussi une perception généralement partagée, selon laquelle les SIG concerneraient prioritairement les thèmes de géographie environnementale ou physique. C'est d'autant plus vrai, que le thème du risque a été isolé comme un grand domaine à part. On constate cependant un certain rééquilibrage dans la période récente.

Figure 7 - Nombre d'articles SIG par domaines de la géographie

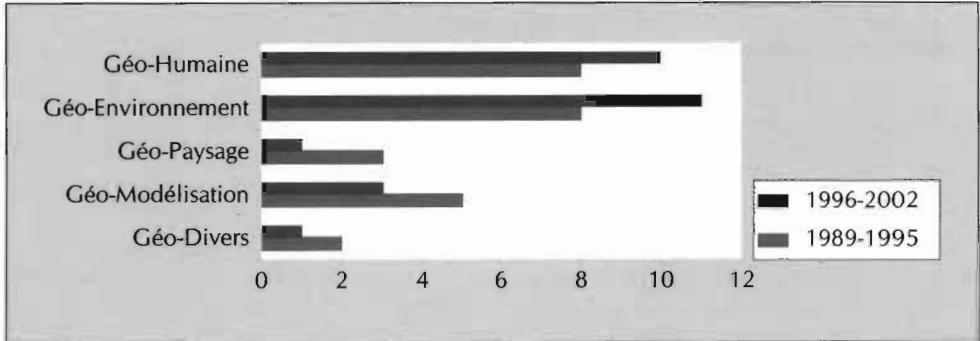
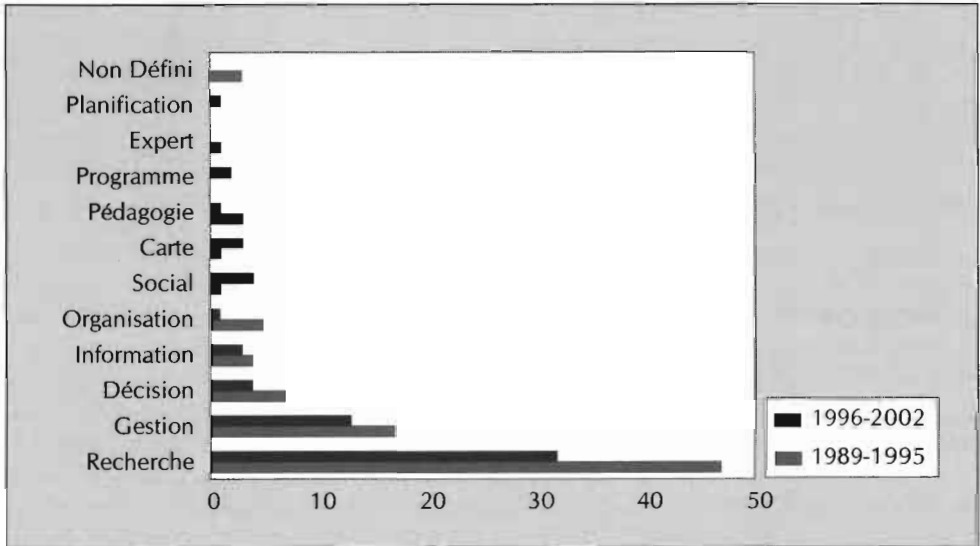


Figure 8 - Finalité de l'article



Les finalités de la recherche

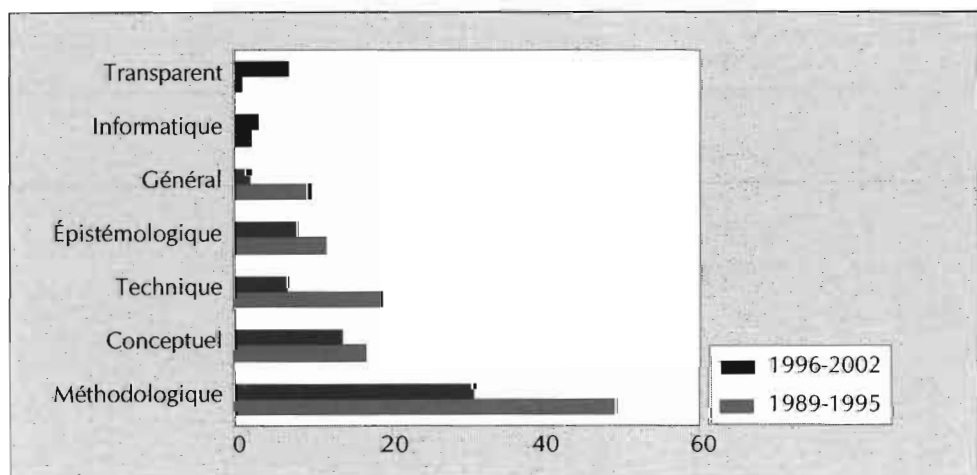
Le second descripteur distingue les articles en fonction de la finalité générale du projet relatif (fig. 8). L'étude du corpus nous a conduit à une liste de 11 finalités possibles, un article pouvant relever de plusieurs finalités. Il peut rendre compte des résultats d'une recherche, éclairer une application de gestion, aider à une procédure de décision, construire un outil ou une démarche de pédagogie, mener une analyse à dimension sociale ou organisationnelle, mettre en place une démarche de planification, un système d'information, réaliser un logiciel ou un programme informatique, publier une carte, mettre en œuvre une démarche d'expert. Le type d'article sélectionné met bien entendu la finalité recherche en tête des résultats. Malgré cela, il faut noter la présence forte des problématiques de gestion (de l'espace, de l'environnement, de l'aménagement...)

mais aussi de l'aide à la décision. Ce dernier thème fait, par l'intermédiaire du SIG, une entrée significative dans la recherche en géographie. Les autres finalités sont en trop petit nombre pour être interprétées. On pourrait s'interroger sur la baisse de l'analyse organisationnelle et la montée symétrique de l'analyse sociale, mais le point saillant est leur caractère marginal dans la littérature géographique sur les SIG.

Les points de vue sur les SIG

Le troisième descripteur rend compte du point de vue que l'article ou la communication adopte sur le thème des SIG, indépendamment de sa thématique (fig. 9). Nous avons appelé méthodologiques les articles qui visent à exposer une démarche permettant de répondre à un problème ou à une question spécifique. C'est le point de vue le plus représenté dans les publications. Vient ensuite le point de vue conceptuel, qui consiste à proposer de nouveaux concepts ou de nouvelles notions pour penser une situation. Le point de vue technique, qui accorde une grande place aux procédures pratiques de la discipline concernée (outils, programmes ou logiciels dans le domaine de la géographie, algorithmes ou structures de données en géomatique...), vient en troisième. Notons qu'il baisse significativement dans la seconde période. Le point de vue épistémologique qui s'intéresse aux enjeux et conséquences des SIG sur la discipline de référence de l'auteur, arrive ensuite. Les autres points de vue sont minoritaires. Le point de vue général, qui vise à présenter et expliquer des notions sur les SIG caractérise assez naturellement la période de découverte. Le point de vue informatique, qui prend la question des SIG dans leur aspect de méthodes et de questions informatiques est quasiment absent de la littérature géographique.

Figure 9 - Point de vue adopté sur les SIG



Enfin, le point de vue que nous avons appelé transparent, c'est-à-dire pour lequel le SIG n'est mentionné que par formalité en mot-clé, mais ne fait l'objet d'aucun exposé spécifique n'apparaît que dans la période de maturité. Devenu outil parmi les autres outils, le SIG est mentionné pour mémoire mais non développé. Deux remarques :

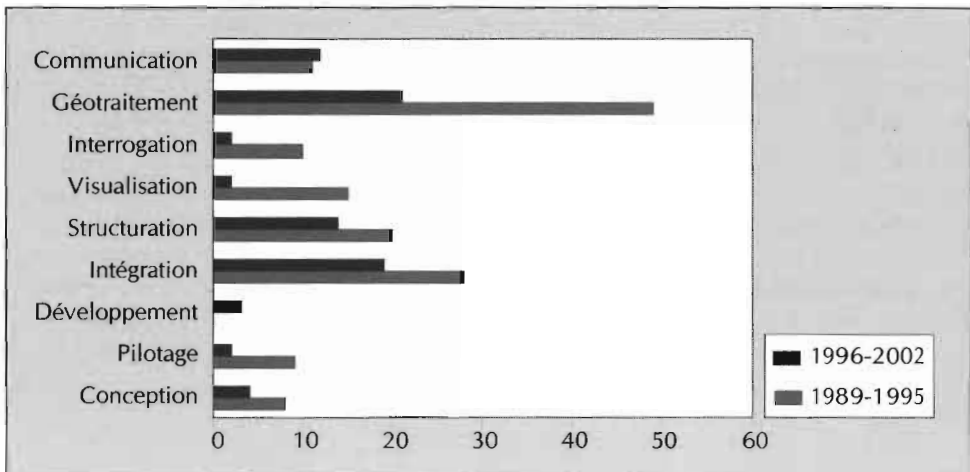
1) Cela peut caractériser aussi bien des articles à forte composante de modélisation quantitative, pour lequel le SIG n'est souvent qu'un réceptacle habituel et anodin des données, que des études de géographie plus descriptive utilisant les fonctions des SIG pour produire des cartes ;

2) Cela peut souligner en creux les lacunes de l'étude. Il est possible que dans des articles non répertoriés les SIG fussent utilisés aussi sans le mentionner dans un mot-clé. En fait, ce cas est vraisemblablement assez rare. *A contrario*, le grand nombre d'articles où le SIG n'est pas « transparent » est la preuve d'un certain maintien du questionnement sur le rôle et le statut des SIG dans la recherche géographique.

Les fonctions des SIG

Le quatrième descripteur vise à repérer les grandes fonctions des SIG privilégiées dans les articles, en particulier ceux à dimension méthodologique. Il est à utiliser avec discernement car il est périlleux à établir à partir de comptes-rendus parfois très succincts. La figure 10 montre que les fonctions de géotraitements (traitements géométriques, mesures et calculs de distance, algèbre de cartes, interpolation spatiale et géostatistique, analyse topographique, analyse de densité et de potentiel, etc.) sont les plus citées (3/4 des auteurs s'y réfèrent) mais que leur domination diminue avec le temps. Les fonctions de symbolisation (construction de documents à la sémiologie élaborée : cartes thématiques et statistiques, diagrammes, atlas papier ou électroniques...), proches de la cartographie et privilégiées par un support comme Mappemonde, devançant les fonctions de visualisation-navigation (exploration attributaire et spatiale, navigation 2D/3D, liens entre les vues...) plus interactives et plus souples.

Figure 10 - Fonctions SIG



Les fonctions d'interrogation (requêtes attributaires, spatiales, calculs attributaires...) sont plus rarement mises en avant. Ensuite viennent dans l'ordre les fonctions situées en amont, l'intégration des données (saisie et acquisition, géoréférencement, mesure des erreurs, métadonnées...) et la structuration (choix des structures informatiques, or-

ganisation des données, modes et formats, généralisation...) dont l'intérêt occupe une place relative plus importante après 1996. Les fonctions de conception (modélisation d'un territoire ou d'une activité, stratégies de description numérique des phénomènes, modèles de données) et de pilotage (gestion du projet, questions organisationnelles...) concernent peu, et de moins en moins avec le temps, les géographes. Enfin, les tâches de développement informatique liées au SIG sont très peu citées dans notre corpus, et même si elles se concentrent dans la deuxième période elles restent trop rares pour indiquer l'émergence d'une culture, même embryonnaire, du développement informatique chez les géographes.

Commentaire

Les 132 articles répertoriés couvrent donc une grande variété d'applications, de démarches et de domaines thématiques de la géographie. Ils illustrent le caractère multiforme des SIG qui peuvent servir à de multiples applications de recherche. Cette diversité participe aussi du sentiment général que l'on a des SIG dans la recherche française en géographie : une multitude d'expériences et d'approches, entre lesquelles le seul point commun semble être les outils employés. Or, si l'on prend le temps de réfléchir sur des clés de regroupement et de typologie, on esquisse les lignes de forces qui structurent l'activité des SIG en géographie : un intérêt essentiellement méthodologique, avec une permanence des réflexions conceptuelles et épistémologiques ; un accent très appuyé sur les fonctions analytiques et un questionnement qui se reporte du thème de l'interrogation et de la visualisation vers celui de l'intégration et de la structuration des données ; un désintérêt général pour les questions liées à la dimension organisationnelle, à la gestion des projets et aux techniques informatiques. On peut aussi remarquer que coexistent dans cette littérature, à des niveaux d'intensité différents, les différentes vues classiques des SIG : le SIG comme logiciel, le SIG comme système de gestion de base de données, le SIG comme système d'information, et le SIG comme construction sociale. Un des enjeux pour les géographes serait certainement de mieux articuler ces vues complémentaires et d'en proposer une approche géographique intégrée.

Le bilan ci-dessus montre qu'il existe une production scientifique sur le thème des SIG dans la littérature géographique française. Elle est modeste sans être négligeable : 7 à 8 % des chercheurs, 5 % des articles, 5 à 7 thèses bon an mal an : c'est honorable. Mais la déferlante de la géomatique sur la géographie que certains dénoncent et que d'autres espèrent reste inobservable à travers nos indicateurs. En tout état de cause, la place des SIG dans la recherche géographique apparaît en retrait de l'intérêt déclaré des géographes et la géomatique reste confidentielle hors de ses canaux spécialisés de diffusion.

SIG et géographie, les termes du débat

Cela fait donc bientôt 15 ans que les SIG ont émergé dans la recherche géographique française. On va tenter de reconstituer à partir de notre corpus de textes le

questionnement et les débats qui ont accompagné la diffusion des SIG chez les géographes. Nous donnerons ensuite à titre comparatif quelques éléments synthétiques sur la controverse qui a traversé à ce propos la géographie anglo-saxonne de ces 15 dernières années.

Le débat en France

La question des enjeux et conséquences de l'utilisation des SIG en géographie a été posée très tôt dans la géographie française. Les actes du colloque Géopoint de 1994 constituent une expression vivante de la réflexion des géographes sur les SIG au moment de leur émergence (Géopoint, 1994)⁵. C'est le principal exemple d'un échange structuré entre géographes sur ce thème. D'autres contributions ont été produites à l'occasion d'articles de revue. Il s'agit parfois de réflexions construites mais le plus souvent incidentes ou de remarques allusives. Le compte-rendu thématique qui suit se veut avant tout synthétique et regroupe dans une même analyse des arguments développés souvent indépendamment et à des moments différents. Le « débat » dont il est question est donc artificiellement reconstruit.

Qu'apportent les SIG à la géographie ?

Les avis divergent sur les conséquences des SIG pour la géographie. Pour certains, ils ne changent rien, ou presque. Ils permettent seulement de faire la même chose qu'avant mais plus rapidement et donc de réaliser des traitements cartographiques que l'on ne réalisait en fait jamais (Voiron et Dagorne, 1994). H. Mathian défend l'idée qu'ils sont indispensables pour traiter certains objets et un avis partagé est qu'ils permettent des combinaisons de données hétérogènes, impossibles ou difficiles à réaliser sans eux. Waniez, Vizintim et al. (1993) dénoncent la mode « tout SIG » et l'engouement irréfléchi pour un outil à tout faire qui prétendrait remplacer tous les autres. Charre (1994) craint que les SIG ne produisent une régression idiographique de la discipline, conduisant par combinaisons successives de critères à différencier chaque lieu de son voisin : « Il se dégage de cela une odeur qui rappelle un peu celle de la synthèse géographique, donc une odeur un peu rance ». Guermond (1994) reste pour sa part sceptique sur la capacité des SIG à aider à découvrir de nouveaux modèles spatiaux. D'autres pensent cependant qu'ils obligent à réfléchir sur ce qu'est vraiment l'information géographique. Pour Thériault (1996), le principal défi des SIG aux géographes est d'ordre conceptuel ; ils vont obliger ces derniers à formaliser des concepts, qui, bien qu'utilisés dans la discipline depuis longtemps, n'ont jamais reçu de définitions strictes et rigoureuses. L'intérêt des SIG pour l'enseignement de la géographie est aussi mis en avant.

Place des SIG dans la géographie

Pour H. Dao, les SIG sont le nouvel outil central de la géographie, même s'ils sont mieux adaptés à la prise en compte de la réalité dans ses aspects matériels, biophysi-

⁵ Pour ne pas alourdir le texte, nous renverrons aux interventions orales dans les Ateliers par un simple nom d'auteur, sans référence particulière.

ques et techniques que dans ses dimensions sociales et culturelles. F. Durand-Dastès s'inquiète de ce rôle central qu'on leur accorde, alors que c'est l'analyse spatiale qui devrait primer dans le travail du géographe. Pour Dumolard (1994), l'intérêt des SIG est proportionnel à la place que le géographe accorde à l'information spatiale dans sa démarche. Voiron et Dagonne dénoncent à ce propos le syndrome de la base de données, piège que constituerait pour le géographe la quête de la donnée pour la donnée, indépendamment d'une problématique. Waniez, Vizintim *et al.* (op. cit.) pointent aussi le risque « d'ensiler » des données indépendamment de toute problématique. Un débat a lieu sur la nature même des SIG. Sont-ils seulement des systèmes de stockage et de distribution de données ou fabriquent-ils de l'information ? D. Pumain s'inquiète : séparer représentation et traitement de l'information ne constitue-t-il pas un danger pour le géographe ?

SIG et analyse spatiale

Si Mathian et Sanders (1994) considèrent que l'intégration des méthodes d'analyse spatiale et de modélisation au sein d'un SIG est une évolution importante de la géographie, le caractère insuffisant et inadapté des fonctions analytiques des SIG est souvent pointé (Dumolard, 1994). Selon S. Rimbart, les SIG n'ont pas à devenir la priorité des chercheurs, qui feraient mieux de se consacrer à l'amélioration de la sémiologie graphique dans les logiciels, à la diffusion des méthodes d'analyse spatiale et à l'étude des surfaces cartographiques (Rimbart, 1989; Rimbart, 1999). Pour Dumolard, vouloir se passer de la puissance des SIG serait rétrograde. « Si l'outil est puissant, il n'est pas tout puissant et il convient de pallier ses insuffisances ». Pour Charre, la vraie question est d'éviter que les SIG deviennent des « Quid géographiques », des outils à alimenter des inventaires. « Ils doivent donc être associés à un ensemble méthodologique nécessaire à l'analyse spatiale ».

SIG et rapport de la géographie avec les autres disciplines

Certains soutiennent que les SIG renouvellent en la modernisant l'image de la géographie dans le grand public comme parmi les décideurs. Ils lui donnent aussi un nouveau statut dans le concert des disciplines : « Il est satisfaisant de voir qu'à côté des autres disciplines littéraires, où il n'y a pas de contrats avec l'industrie, la géographie se met au même plan que les disciplines scientifiques grâce aux SIG » (Guermond, 1994). Vidal pense qu'avec les SIG les géographes peuvent avoir un rôle de médiateur entre les concepteurs des systèmes et leurs utilisateurs, tels que les décideurs par exemple. Ils auraient aussi un rôle didactique en aidant les gestionnaires territoriaux à passer d'une culture sectorielle à une culture spatiale. Saint-Gérard *et al.* (1994), et d'autres, insistent sur la nécessité impérieuse d'un travail commun entre thématiciens et informaticiens pour développer de nouveaux outils. Pour Thériault (op. cit.), les SIG sont des outils fondamentalement interdisciplinaires et les géographes doivent apprendre à travailler dans cet esprit. Ruas (1994) pense aussi que le croisement de données multi-sources permis par les SIG permettra enfin une interdisciplinarité des sciences géographiques, économiques et sociales. Mais Guermond (op. cit.) s'interroge : les SIG pour des géomètres sont-ils les mêmes que ceux des géographes ?

SIG et géographie appliquée

Pour Dumolard, une géographie appliquée n'est crédible que si elle privilégie « la représentation et la communication de l'information spatiale comme moyens heuristiques de découverte, de validation et de diffusion ». Le SIG devient alors « l'outil incontournable » de cette géographie appliquée. Pottier (1994) est plus dubitatif. Pour lui, la conception de l'espace géographique que proposent les SIG est d'essence structuraliste et se limite à des relations d'ordre géométrique. Elle est peu adaptée « aux appréciations non visibles et immatérielles des dynamiques territoriales » qui sont dominantes en aménagement.

Place des géographes dans le développement des SIG

Dans les débats, une inquiétude est perceptible. Faute de compétences techniques, la maîtrise de l'information géographique ne risque-t-elle pas d'échapper aux géographes (Feyt) ? Les géographes sauront-ils être à la hauteur des coûts et de la complexité technique de ces systèmes ? Comme le formule concrètement Guermond : « est-ce que cela ne va pas se passer en dehors de nous ? Est-ce que l'on ne va pas devoir ramasser les miettes ? »

Le débat anglo-saxon

Le débat qui a agité la géographie anglo-saxonne tout au long de ces mêmes années est d'une autre ampleur. Il s'avère beaucoup plus formalisé, continu et approfondi. Les contributions y sont longues et argumentées, sous forme d'articles complets étayés d'exemples et intégrés dans une controverse scientifique clairement identifiée. Les échanges sont souvent virulents et les critiques portées sur les SIG très violentes [voir entre autres Johnston (1997) ou Pickles (1995)]. Les articles synthétiques de Schuurman (2000) et Sui (1994) nous ont servi pour rappeler les termes principaux du débat. Un premier reproche porte sur le positivisme des SIG à travers leur prétention à rendre compte d'un monde objectif sous une forme numérique et dans un système de données cartésien, qui les conduit à trahir la complexité du réel, en oubliant l'irréductibilité de l'espace social et culturel et en écartant tout ce qui n'est pas observation ou expérience. Les SIG seraient ainsi épistémologiquement liés à un mode de raisonnement hypothético-déductif de type positiviste et écarteraient sans procès d'autres modes de raisonnement tout aussi valides (dialectique, déconstructiviste...). Ils conduiraient à privilégier les questions techniques par rapport aux interrogations fondamentales de la discipline. Leur utilisation généralisée en géographie risquerait de faire retomber celle-ci dans son travers descriptif et de conduire à l'empirisme le plus naïf. Les recherches menées avec les SIG seraient en effet pilotées par les données, le plus souvent de seconde main, sans théorie cohérente pour les guider. Les recherches avec SIG seraient extrêmement dépendantes des intérêts privés ou des enjeux des pouvoirs locaux et nationaux et conduiraient leurs concepteurs à soumettre leurs travaux à des objectifs extrascientifiques, essentiellement pratiques et acritiques. On a dénoncé aussi le fourvoiement politique et éthique de la géographie des SIG dans la participation à des appareils de surveillance et d'encadrement des individus et des groupes.

Les géographes tenants des SIG ont vu dans ces accusations, essentiellement et pour aller vite, l'expression extrême des errements anti-scientifiques et relativistes d'une partie des géographes américains, la conséquence d'une inculture technique et le résultat d'une méfiance, comme le dit Unwin, *op. cit.*, « non seulement vis-à-vis de toute quantification mais même de tout travail fondé sur l'utilisation de données ». Mais elles ont été cependant entendues comme un appel à mieux explorer la question des usages sociaux des SIG, qui est maintenant un domaine de recherche très développé outre-atlantique. Elles ont aussi conduit les géomaticiens anglo-saxons à réinterroger leur positionnement scientifique et à tenter de fonder une science de l'information géographique, appelée aussi parfois *geocomputation*, sur un paradigme émergent, opposé point par point aux « vieilles » sciences et qui renverrait de facto la géographie traditionnelle au magasin d'antiquités (Longley, Goodchild et *al.*, *op. cit.*).

Le débat français apparaît a posteriori comme un peu provincial comparé au débat anglo-saxon, beaucoup plus international. Cela illustre un phénomène dont on n'a pas toujours conscience : le caractère universel de l'outil SIG se traduit par une « mondialisation » de la recherche géographique sur ces thèmes. Rares sont les géographes français à se situer à ce niveau d'intervention. La virulence du débat anglo-américain peut certainement s'expliquer par des traditions culturelles de l'expression scientifique. Mais l'importance des enjeux d'influence académique et l'énormité des financements privés et publics de la recherche liés aux SIG aux États-Unis et en Grande-Bretagne n'y sont certainement pas étrangères. Elle s'explique aussi, ainsi que le caractère beaucoup plus fondamental et épistémologique de la critique des SIG dans la géographie anglo-saxonne, par la liste des débatteurs. Dans le débat anglo-saxon, les critiques viennent des « social-scientists » et des thèses post-modernes, post-positivistes ou relativistes qu'ils épousent. Dans le débat français, de manière inattendue, les critiques les plus fortes contre les SIG viennent au début du côté des tenants des approches « quantitatives » et de l'analyse spatiale (Dumolard, Charre, Rimbart...), qui perçoivent souvent les SIG comme des outils commerciaux, complexes et lourds, au mieux insuffisants, au pire dangereux. Cette différence s'explique par le fait que le débat français regroupe autour des praticiens des SIG, les habitués des rencontres du Groupe Dupont ou du groupe Reclus, c'est-à-dire essentiellement des géographes quantitativistes et spécialistes de l'analyse spatiale et des chercheurs intéressés par les questions de méthode, de conceptualisation, de modélisation ou de formalisation, qu'elle soit instrumentalisée ou non. Sont restés à l'écart du débat de nombreux géographes aux approches plus « classiques », les géographes physiciens et ceux intéressés par la question des représentations, de la géographie culturelle, sociale ou économique, de la géographie historique ou même des approches environnementales et nombre de « théoriciens » de la géographie.

Les différences entre les deux débats peuvent s'expliquer aussi par le décalage dans la pratique des SIG que l'on constate entre la France et les États-Unis. Les principaux arguments du débat ont été avancés il y a bientôt 10 ans, à un moment où les géographes français en étaient encore à la découverte de ces outils, tandis que les géographes américains contribuaient, pour certains, à leur développement depuis la fin des années soixante et que tous pouvaient observer leur diffusion très rapide dans la société américaine.

En conclusion, et la situation actuelle ?

Ce qui est plus inquiétant à nos yeux, c'est l'apathie qui semble caractériser la réflexion des géographes français sur les SIG depuis quelques années. Il semble qu'une fois retombé l'effet de la nouveauté, une sorte d'indifférence épistémologique et méthodologique se soit installée. « Nouvelle mode qui passera, simples outils techniques qui ne changent rien de fondamental à la discipline » sont autant de jugements sur les SIG très courants parmi les géographes. Il existe peu de discussions ou d'échanges sur la place, le rôle, l'intérêt, les enjeux, les contraintes ou les dangers de ces outils dans la discipline à différents niveaux : formation des géographes, organisation de la recherche, travail interdisciplinaire, nouvelles formes d'expertise en aménagement et gestion environnementale ... Comme on l'a vu, la place des SIG dans les revues de géographie est très faible et les questions de fond rarement abordées, alors que la diffusion des SIG dans la société française multiplie les exemples concrets à observer et devrait justement donner lieu à une multiplication des recherches.

Une nouveauté notable est cependant l'apparition récente de critiques des SIG venant des approches de géographie culturelle et sociale. Mais, elles relèvent de la pétition de principe, sonnent souvent comme un écho atténué de la polémique anglo-saxonne et tombent un peu à contretemps. Deux exemples : « Les SIG constituent le fond de commerce exceptionnellement puissant de la géographie américaine dans lequel une logique technicienne sophistiquée éradique l'esprit des lieux » (Entrikin 2000). « ... de plus en plus d'étudiants en géographie se tournent vers la cartographie et les SIG, fascinés par la puissance et le prestige de ces outils, mais également en réponse à la demande croissante des entreprises et des collectivités locales. Les publications techniques sur ces sujets se multiplient. Sur le plan épistémologique, ceci correspond à un glissement dangereux. (...) La dérive de la géographie vers les SIG risque de réduire la discipline à une technique de manipulation de données, abandonnant à d'autres le soin (et la responsabilité) de poser les bonnes questions, de construire les bonnes interprétations » (Staszak 2001)⁶. Les critiques anglo-saxonnes contre les SIG étaient plus radicales. Elles ne parlaient pas de dérive technique mais d'une déviance complète, une erreur, pour reprendre les mots de Sui, à la fois « ontologique, épistémologique, méthodologique et éthique ». Mais, surtout ces critiques étaient reliées, pour les plus intéressantes d'entre elles, à des observations et des enquêtes précises, et à une connaissance concrète des outils et applications en cause. Est-ce bien le cas en France ?

Est-il raisonnable de craindre une dérive technique de la géographie française ? Le présent travail conduit à dissiper l'idée d'une dissolution de la géographie dans la géomatique. Mis à part l'intérêt continu d'un groupe minoritaire, c'est plus une indifférence générale, teintée de scepticisme, voire d'hostilité envers les SIG, qui semble régner actuellement chez la majorité des géographes français. On constate même actuellement, et c'est l'autre face de la question, une baisse d'intensité de l'investissement

⁶ Si la question est recevable, on peut regretter qu'elle soit posée hors des canaux habituels de la géographie. Combien de géographes auront lu le chapitre sur la géographie du manuel d'épistémologie des sciences sociales dirigé par Jean-Michel Berthelot (2001) ?

conceptuel des géographes dans la géomatique, mesurée à travers leur participation à Cassini-Sigma ou à la Revue internationale de géomatique. C'est paradoxal alors que les SIG n'ont jamais été autant utilisés dans la gestion territoriale, l'environnement, l'aménagement et que leur utilisation se banalise rapidement dans les disciplines voisines (archéologie, écologie, agronomie, hydrologie, économie spatiale...).

Pour le coup, c'est cette indifférence méfiante qui risque finalement d'être la cause de la dérive technologique soi-disant redoutée. La coupure entre géomaticiens et géographes risque de s'étendre. Les géographes non spécialistes vont se trouver incapables de suivre le développement des techniques géomatiques. Et les liens des géographes-géomaticiens avec leur discipline d'origine se distendront. La pratique des SIG par les géographes se trouvera déconnectée à la fois des travaux théoriques en géomatique et des réflexions conceptuelles et critiques de la géographie. Les systèmes d'analyse et les bases de données spatialisées se feront sans esprit géographique. Quant aux bonnes questions et aux bonnes interprétations à faire avec ces outils, ce seront les spécialistes d'autres disciplines ou des équipes interdisciplinaires sans géographes qui les poseront et les donneront. La crainte de Géopoint 94 d'une nouvelle occasion manquée serait-elle en train de se réaliser ?

Références

- BERTHELOT J.-M., éd. (2001). *Épistémologie des sciences sociales*. Paris, PUF. 593 p.
- CHARRE J. (1994). *SIG, analyse spatiale et modélisation*. Géopoint 94, SIG, Analyse spatiale et aménagement, Université d'Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. 37-42.
- DUMOLARD P. (1994). *Systèmes d'Information géographique, une vue d'ensemble*. Géopoint 94 SIG, Analyse spatiale et aménagement, Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Université d'Avignon. 10-13.
- ENTRIKIN N. (2000). *Le langage géographique dans la théorie démocratique*. in Logiques de l'espace, esprit des lieux. Géographies à Cerisy. J. Lévy et M. Lussault. Paris, Belin: 189-199.
- GÉOPOINT (1994). *Retranscription des débats par ateliers*. Géopoint 94 SIG, Analyse spatiale et aménagement, Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Université d'Avignon. 187-228.
- GROUPE DUPONT (1994). *SIG, Analyse spatiale et aménagement*. Géopoint 94, Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Université d'Avignon. 231 p.
- GUERMOND Y. (1994). *Conclusion de Géopoint 94*. Géopoint 94, Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Université d'Avignon. 187-228.
- JOHNSTON R. J. (1997). *Geography and Geographers, Anglo-American Human Geography since 1945*. London, Edward Arnold. 475 p.
- JOLY G. (2002). *Répertoire des géographes français*. Paris, CNRS-Prodig.
- MATHIAN H. et SANDERS L. (1994). *SIG, modélisation dynamique et recherche*. Géopoint 94, SIG, Analyse spatiale et aménagement, Université d'Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. 143-147.
- MATOUX-LAMBERT C. (1993). *20 ans pour un Répertoire; le Répertoire des géographes*. in Matériaux pour une sociologie de la géographie. D. Dory, Douzant-Rosensfeld et R. Knafou. Paris, L'Harmattan: 29-45.

- PICKLES J., éd. (1995). *The Social Implications of Geographic Information Systems*. New-York, The Guilford Press. 248 p.
- POTTIER P. (1994). *SIG et aménagement : avec quelle géographie ?* Géopoint 94, SIG, Analyse spatiale et aménagement, Université d'Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. 163-165.
- RIMBERT S. (1989). *GIS ou pas ?* Mappemonde 1989, n°1: p. 1-3.
- RIMBERT S. (1999). *À propos de la « key to the door ».*
- RIMBERT S. et LENGELLÉ J. (1969). *Vers une automatisation de la cartographie thématique*. La revue de géographie de Montréal (XXIII,2): 187-193.
- RUAS A. (1994). *SIG et grandes bases de données*. Géopoint 94, SIG, Analyse spatiale et aménagement, Université d'Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. 53-58.
- SAINT-GÉRAND T. et BERGER M. (1994). *Adopter ou adapter les SIG pour la recherche en SHS*. Géopoint 94, Université d'Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. 3 p.
- SCHURMAN N. (2000). *Trouble in the heartland : GIS and its critics in the 1990s*. Progress in Human Geography 24, 4: 569-590.
- STASZAK J.-F. (2001). *La géographie*. in Epistémologie des sciences sociales. J.-M. Berthelot. Paris, PUF.: p. 77-116.
- SUI D. Z. (1994). *GIS and urban studies: Positivism, post-positivism, and beyond*. Journal of Geography 94(6): 578-591.
- THÉRIAULT M. (1996). *L'intégration des études environnementales et des SIG pour appuyer les décisions d'aménagement. Un objet de recherche prometteur*. Revue de géographie de Lyon 71. n° 2/96: 2.
- UNWIN D. (1999). *EUROQUANT at 21: 'coming of age'?* Cybergéo N° 114,.
- VOIRON C. et DAGORNE A. (1994). *Système d'information géographique et analyse d'image*. Géopoint 94, SIG, Analyse spatiale et aménagement, Université d'Avignon, 25-26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. 43-48.
- WANIEZ P., VIZINTIM M. et BRUSTLEIN V. (1993). *Pour l'expérimentation des SIG en géographie, le SIG Paraná*. Mappemonde (3/93) : 29-34.

Pluridisciplinarité et géomatique

Retour sur expérience

Didier JOSSELIN, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, France

E-mail : didier.josselin@univ-avignon.fr

Résumé : L'objectif de cet article est d'analyser les relations entre la géomatique, en tant que domaine, discipline ou métier, et nos pratiques de recherche dans ce qu'elles ont de pluridisciplinaire au sens large du terme. Quels sont les niveaux possibles de relation entre les disciplines scientifiques en géomatique, et qu'apportent ces relations à la recherche ? La géomatique peut-elle constituer une métadiscipline avec son identité et ses propres objets de recherche ? Nous aborderons ces questions en présentant quelques-unes des formes théoriques des relations entre les disciplines scientifiques et en détaillant leur place dans une expérience concrète de recherche-action dans le domaine des transports à la demande.

Mots clés : pluridisciplinarité, recherche-action, géomatique, SIG, transport à la demande.

Multidisciplinarity and geomatics A critical analysis of an experience

Abstract: In this paper, we initiate a discussion on the relations between geomatics and multidisciplinary. What are the possible levels of relationship between scientific disciplines and domains and what are their added assets to research? Can geomatics become a metadiscipline with its identity and its own research objects? We tackle these questions by presenting the main types of pluridisciplinarity and a concrete experience of "research-action" we developed in the field of demand responsive transportation.

Key words : multidisciplinary, « research-action », geomatics, GIS, demand responsive transport.

Introduction

Discuter de l'apport des SIG à la recherche nous amène à choisir entre deux postures. La première, la plus courante, serait de présenter nos travaux et d'évaluer ce que l'utilisation des SIG a apporté à notre connaissance thématique et méthodologique sur nos spécialités de recherche. La seconde vise à analyser les relations existant entre la géomatique, considérée comme un domaine, une discipline ou un métier, et nos pratiques de recherche dans ce qu'elles ont de pluridisciplinaire au sens large du terme. C'est la posture dominante que nous adopterons. Quels sont les modes

et les niveaux possibles de relation entre les disciplines scientifiques, notamment en géomatique, et qu'apportent ces relations à la recherche ? Nous aborderons cette question en présentant ces relations sous quelques-unes de leurs formes théoriques et en analysant en détail leur place dans un processus concret de recherche-action que nous menons depuis quelques années. Le recours systématique mais non exclusif à des outils et méthodes relevant de la géomatique (SIG interactifs, SIG-Transport, simulateur de lignes virtuelles) sera également évoqué. À la lumière de cette expérience dans le domaine de la géomatique appliquée aux transports à la demande, nous chercherons à prendre du recul par rapport à nos pratiques et discuterons du devenir de la géomatique en tant que métadiscipline à part entière.

Niveaux de relation entre les disciplines scientifiques

Depuis quelques années, les grands organismes de l'État incitent les partenaires de recherche et développement à mettre en oeuvre des programmes dits *pluridisciplinaires*. Décideurs, collectivités, sociétés privées, chercheurs, etc., sont amenés à coopérer dans des projets souvent de grande ampleur et sur des durées conséquentes. Quels sont les différents modes de relation entre les disciplines ? De quelle(s) manière(s) ces projets se déploient-ils ? Ce chapitre présente les niveaux de relation théoriques et pratiques entre les disciplines scientifiques.

Transdisciplinarité, interdisciplinarité, polydisciplinarité, pluridisciplinarité...

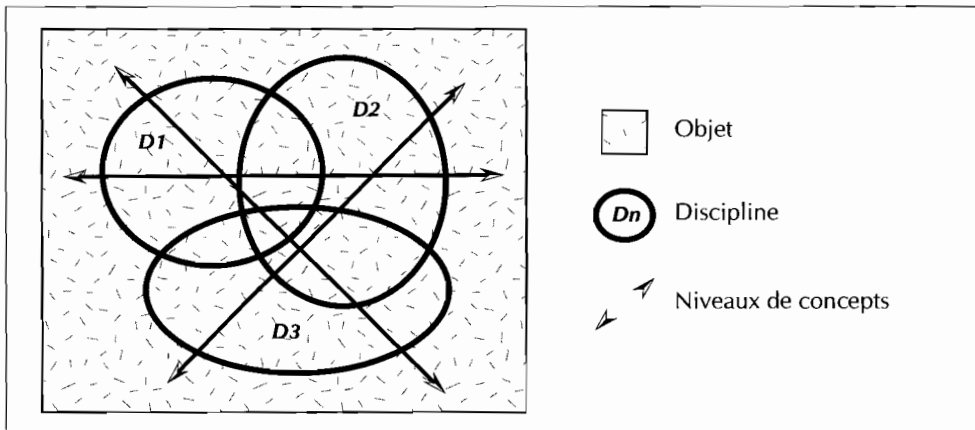
Le dictionnaire Larousse regroupe sous le terme de « discipline » trois définitions dont la co-présence en suggère une appréciation particulière. En effet, la discipline est à la fois « une matière d'enseignement, un objet d'étude, une science », « un ensemble de règlements régissant certains corps, certaines assemblées », mais également « un fouet, un instrument de pénitence ». Cela amène Edgar Morin à considérer la discipline comme « un moyen de flageller celui qui s'aventure dans le domaine des idées que le spécialiste considère comme sa spécialité » (Morin, 1994). En effet, le risque est grand de voir les disciplines scientifiques se replier sur elles-mêmes, devenir à la fois réceptacle et cause d'un processus de reproduction intellectuelle et d'hyperspécialisation de ses chercheurs, évoluer en renforçant leur autonomie, leurs frontières, leur impénétrabilité et leurs certitudes. Ce risque prend d'autant plus d'acuité que les technologies et les concepts associés atteignent des niveaux de complexité inégalés. Il existe pourtant de multiples formes de relations entre les disciplines. En voici quelques-unes présentées de manière théorique.

Transdisciplinarité

Certes, la réification d'objets de recherche propres à la discipline, la naissance d'un jargon technique vécu comme un vecteur efficace de l'information sur l'innovation interne et les pratiques renforcées d'échange au sein même de la discipline peuvent induire des avancées significatives dans la connaissance. Mais à l'opposé, une telle évolution des sciences conduit inévitablement à délaisser lentement mais sûrement,

les questions fondamentales de la recherche et de la connaissance, transversales à toutes les disciplines (Morin, 1998). Cela a amené Lima de Freitas, Edgar Morin et Basarab Nicolescu à élaborer la *charte de la transdisciplinarité* adoptée en 1994 au Portugal par les participants au 1^{er} congrès mondial de la transdisciplinarité. Sans être pour autant normative, cette charte, composée d'un préambule et de quinze articles, pose en substance les principes essentiels d'une orientation commune de recherche, traversant, confrontant et transcendant les disciplines réconciliées, ouvertes et tolérantes (Charte de la Transdisciplinarité¹, 1995). Elle se place en complément des approches disciplinaires sans les réfuter. Au-delà du simple cadre déontologique de la pratique scientifique, la charte s'oppose au réductionnisme et prône l'approche systémique (von Bertalanffy, 1968).

Figure 1 - Transdisciplinarité



L'objet et les concepts de recherche transcendent des disciplines qui se recouvrent

Interdisciplinarité et polydisciplinarité

On peut identifier d'autres niveaux de relation entre les disciplines. Si la *transdisciplinarité* (fig. 1) en constitue probablement la forme la plus aboutie (Nicolescu, 1996), par son caractère multiréférentiel (relativité des définitions disciplinaires et de la supposée objectivité) et multidimensionnel (impossibilité de réduire la réalité à la seule logique de champ), d'autres termes coexistent. Il semble opportun de les expliciter, tant leur polysémie est grande.

Ainsi, André Bourguignon (1997) justifie l'*interdisciplinarité* par l'existence d'un objectif commun à plusieurs disciplines, pour valider une théorie, éclairer des concepts ou interpréter des données (fig. 2). Cela passe par la création d'un langage commun afin d'élaborer *in fine* un formalisme suffisamment général et partagé, sans remettre en cause toutefois les positionnements fondamentaux et l'existence même des disciplines. Une telle évolution peut aboutir à la *polydisciplinarité* (fig. 3), dessinant les contours d'une *métadiscipline* ayant intégré tout ou partie de plusieurs disciplines (Morin, 1994).

¹<http://sgwww.epfl.ch/UF1/observatoire/nicolescu>

Figure 2 - Interdisciplinarité

Les disciplines élaborent un langage partagé autour d'un objet de recherche commun.

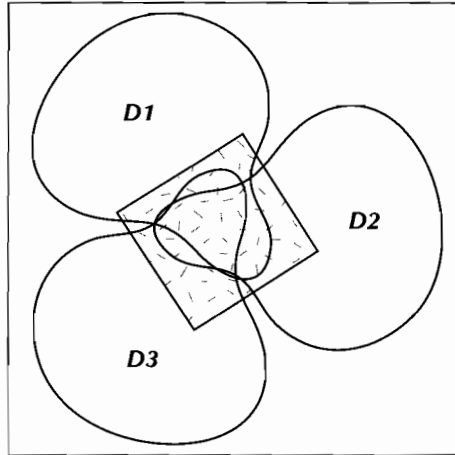
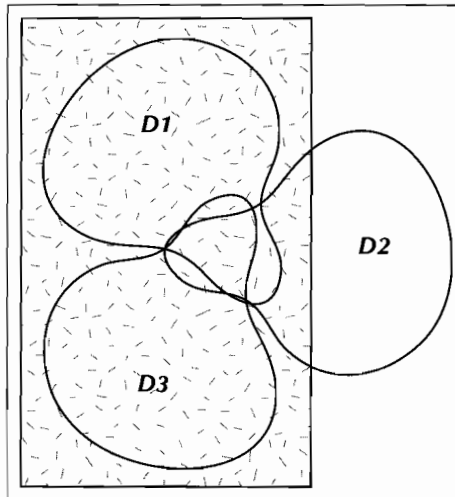


Figure 3 - Polydisciplinarité

Une métadiscipline se crée par intégration de plusieurs disciplines.



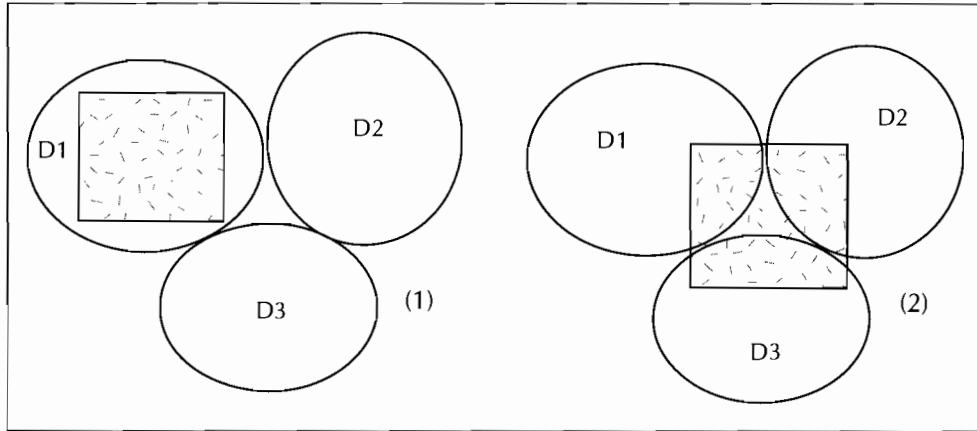
Pluridisciplinarité

Enfin, Basarab Nicolescu (1986) souligne que la *pluridisciplinarité* (le terme anglo-saxon étant *multidisciplinarity*) concerne « l'étude d'un objet d'une seule et même discipline par plusieurs disciplines à la fois ». Elle implique des disciplines qui s'associent en vue d'un objectif commun, sans qu'aucune n'ait à « modifier sensiblement sa propre vision des choses et ses propres méthodes »². À ce titre, elle représente la forme la moins évoluée de relation entre les disciplines, quoique la plus répandue dans la pratique (fig. 4). Quant à la multidisciplinarité (faux-ami de son équivalent anglais), nous l'entendons comme une simple juxtaposition de plusieurs disciplines, sans objet com-

mun. Elle se situe donc en dehors du champ strict des relations entre les disciplines. De la multidisciplinarité à la transdisciplinarité, la transversalité et la profondeur des questions scientifiques posées s'accroissent, au détriment de la facilité à les résoudre.

Figure 4 - Pluridisciplinarité

Un objet de recherche propre à une discipline (1) ou à l'interface de plusieurs disciplines (2) est traité par une association de celles-ci.



Niveaux de pluri/interdisciplinarité

Spécialistes, experts et acteurs

Après avoir précisé les modalités des relations possibles entre les disciplines scientifiques, nous pouvons maintenant définir trois niveaux pragmatiques de relations entre les disciplines, selon les personnes impliquées et leurs prérogatives. Selon nous, ils peuvent à la fois concerner des cas de pluridisciplinarité et d'interdisciplinarité. D'une part, au sein d'une même discipline ou d'un même service (services techniques ou laboratoires par exemple), des spécialistes construisent fréquemment des projets en partenariat. D'autre part, dans des structures informelles élargies (comme les Groupements de Recherche du CNRS, ou des équipes temporaires mises en place par des sociétés de service en informatique comme SEMA Group par exemple), des experts d'horizons et de statuts variés (chercheurs, opérationnels ou politiques) mais d'un même domaine, peuvent mettre en commun leurs compétences sur une période de temps déterminée. Enfin, le troisième niveau de pluri/interdisciplinarité agrège à la faveur d'un projet particulier, des partenaires de tous les domaines, de toutes les disciplines et de tous les statuts, devenant des acteurs centrés sur un objet commun. Du premier au troisième niveau, le poids de la structure d'appartenance de l'individu diminue quand celui du projet commun augmente. À la nécessaire complémentarité des protagonistes s'ajoute l'ouverture vers l'autre spécialiste, l'autre expert, l'autre acteur.

² extrait de l'article de Pierre Delattre dans l'encyclopédie Universalis, 1997.

Données, concepts, processus de décision

Une autre dimension parallèle caractérise la pluri/interdisciplinarité. Il ne s'agit pas seulement de s'asseoir autour d'une table et réfléchir ensemble sur un sujet commun pour faire de la pluridisciplinarité ou de l'interdisciplinarité. Il s'agit d'accepter de partager, en s'ouvrant au regard critique des autres, en acceptant potentiellement certains compromis, à défaut de trouver le consensus. Cette démarche implique, selon nous, plusieurs niveaux possibles de partage. Le premier niveau, minimal est celui des données. Lorsque les objectifs du projet le permettent, les partenaires doivent s'engager à mettre à disposition toutes les données utiles au projet et à s'intéresser le cas échéant à celles de autres. Ces données, enjeux de pouvoir, peuvent s'associer à des informations de plus haut niveau, voire des connaissances ou des concepts. Savoir les partager, sans avoir peur qu'autrui s'en empare, constitue une avancée significative dans l'intégration pluri/interdisciplinaire. Le niveau le plus élaboré réside dans le partage du temps et du soi (dévoiler à l'autre sa propre méthode d'investigation) lors des processus d'apprentissage et de décision. En effet, les experts ont souvent l'habitude de travailler séparément. Lorsque l'acquisition des connaissances se réalise lors d'une séquence d'échange (d'interaction) en groupe, les résultats sont potentiellement beaucoup plus probants que si l'on juxtapose les conclusions et les expériences individuelles (Abric, 1999).

Quel que soit le niveau requis de pluri/interdisciplinarité, le processus connaîtra de difficultés dues aux contraintes de langage, aux objectifs incompatibles en apparence, et aux visions conceptuelles et épistémologiques parfois divergentes ou incohérentes. Elles seront d'autant plus marquées que les partenaires viendront d'horizons variés, mais largement surmontables grâce aux évolutions de chacun dans le temps (phase de création d'un langage commun) et aux retombées fructueuses que les investissements individuels auront permises. Vous l'avez compris : nous militons pour une approche pluri/interdisciplinaire, *a fortiori* celle du troisième type, qui mutualise des synergies autour d'un projet, plus précisément qui réunit des acteurs complémentaires sur un objet commun, prêts à partager leurs données, leurs connaissances et leurs concepts, ainsi que leurs approches intrinsèques dans le processus de décision.

Approche métadisciplinaire et métadiscipline

Notion de métadiscipline

Certaines disciplines scientifiques apparaissent davantage enclines à émettre des questionnements traversant plusieurs disciplines, soit à cause de leurs domaines et de leurs champs spécifiques d'investigation, soit par une opportunité ou une maturité qui les amène à s'ouvrir sur l'extérieur. Ce qu'elles suscitent comme nouvelle dynamique scientifique peut être qualifié globalement d'approche *métadisciplinaire*, voire de *métadiscipline*, s'il est possible d'en définir les contours et de rendre prégnant le sentiment d'appartenance de ses chercheurs. Pratiquement, l'approche métadisciplinaire permet d'englober, sous le même terme (comme peut le faire le terme générique de *pluridisciplinarité*, largement ancré), toutes les formes de relations entre les disciplines. Selon nous, les métadisciplines ne fonctionnent pas de la même façon que les disciplines. Elles ne sont pas forcément immuables. Elles peuvent tour à tour devenir des processus

pluri/poly/interdisciplinaires, voire transcender les disciplines. *Les métadisciplines se placent au dessus des autres disciplines*, non pas qu'elles les dominent ou les embrassent, mais plutôt parce qu'elles disposent d'un statut particulier : *elles n'existent qu'à travers les relations entre les disciplines*, leurs contours sont difficilement discernables, leurs questions de recherche ne se suffisent pas de tout ou partie d'une unique approche disciplinaire.

Exemples de métadisciplines

Comme le souligne Edgar Morin (1994), « certains processus de complexification de champ de recherche disciplinaire font appel à des disciplines très diverses en même temps qu'à la polycompétence du chercheur : un des cas les plus éclatants est celui de la préhistoire ». Dans cet exemple, c'est la discipline elle-même qui s'est placée en position de polydisciplinarité, par son évolution naturelle. Notons par ailleurs qu'une partie de cette métadiscipline traite d'objet dans l'espace et participe aux recherches dans le domaine de la géomatique.

On peut aussi citer, à titre d'exemple, les sciences qui composent ou participent, de près ou de loin, à la « galaxie cognitive », qu'évoque Daniel Andler (1992) : la psychanalyse, la psychologie sociale, la linguistique, les neurosciences, l'anthropologie, l'intelligence artificielle, la logique, la philosophie, les mathématiques, la physique et l'informatique. Toutefois, cet auteur note que la plupart de ces sciences, dont les travaux sont incontestables, se développent en dehors de la « problématique cognitive et ne se soucient pas de lui apporter directement des matériaux ». C'est plutôt de la dialectique entre ces disciplines que naissent les sciences cognitives dont les limites restent délicates à cerner (une des rares formes de transdisciplinarité ?).

Plus récemment, la création du département pluridisciplinaire des Sciences et des Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) du CNRS participe du mouvement d'émergence des métadisciplines. Celui-ci s'appuie sur quatre grands domaines disciplinaires : informatique et traitement de l'information ; système, signal et composant ; dispositifs et technologies micro et nano ; interactions humaines et cognition. Les applications clés des STIC concernent l'éducation, la santé, le transport, la ville, le handicap, les arts et technologies, l'économie, l'habitat, le militaire, le spatial et l'environnement. Cette fois-ci, les contours paraissent bien définis, même si le contenu peut sembler parfois quelque peu hétérogène, résultat d'un processus vertical d'éclosion de la métadiscipline. Partie intégrée des STIC, la géomatique n'est elle pas elle-même une métadiscipline ?

La géomatique : de la multidisciplinarité à la métadiscipline ?

Sans entrer dans des descriptions ou des modélisations d'acteurs et des réseaux sociaux (Amblard & Ferrand, 2000), il peut être intéressant de développer une réflexion rétroactive sur nos propres pratiques, tant, on le sent bien lorsque l'on participe à des programmes transversaux, l'efficacité des recherches et l'intérêt des projets dépend de la façon dont les échanges se font entre les individus et les disciplines. Dans un premier temps, nous « décortiquerons » une expérience de géomatique appliquée aux

transports flexibles urbains en Franche-Comté. Puis nous entamerons une discussion sur le statut de métadiscipline que pourrait revêtir la géomatique.

Transport à la demande en milieu urbain : déroulement d'une expérience inter/transdisciplinaire

Nous proposons maintenant de discuter de la place et de l'importance des relations entre les disciplines et les partenaires dans un projet que nous menons depuis six ans dans le domaine de la géomatique appliquée aux transports. Nous chercherons, dans les lignes qui suivent, d'une part à identifier selon la typologie fournie dans la première partie de cet article, les niveaux d'échange et d'intégration des protagonistes autour d'un objet et d'objectifs communs. D'autre part, nous identifierons les outils et les méthodes géomatiques qui ont été sollicités ou produits à la faveur de ce projet.

Une recherche-action dans le domaine de la géomatique appliquée aux transports à la demande

Ce projet a associé des chercheurs, géographes (laboratoires TheMA et ESPACE) et informaticiens (Laboratoire d'informatique de l'université de Franche-Comté), une société de transport locale (la Compagnie des transports de Besançon [CTB], filiale de Kéolis, filiale de la SNCF) et une Autorité organisatrice des transports [AOT] (la ville de Besançon, puis la Communauté d'agglomération du Grand Besançon). D'autres partenaires ont participé à la dynamique du projet en la finançant ou en y participant ponctuellement. C'est le cas de l'Agence pour le développement, l'économie et la maîtrise de l'énergie (ADEME), le Conseil régional (CR) de Franche-Comté et l'Agence nationale pour la recherche et la technologie (ANRT), le ministère de la Recherche.

Il s'agit d'une *recherche-action* visant à mettre en place un transport à la demande (TAD), c'est à dire un transport collectif individualisé qui n'est activé qu'à la demande. Le site d'expérimentation qui a été choisi est la ville de Besançon, puis la Communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB). Le but *action* était de combler un vide dans l'offre de transport en acheminant les personnes aux TGV partant de la gare Viotte aux heures de franges (tôt le matin et tard le soir pour le retour). L'objectif *recherche* était de réduire l'utilisation du véhicule personnel, en regroupant les voyageurs, en minimisant le nombre de véhicules roulants et les distances totales parcourues. Il a nécessité la mise au point d'algorithmes spécifiques d'optimisation spatio-temporelle de tournées. Aujourd'hui, le service compte quelque 3 000 clients par an et correspond à une niche commerciale. Il atteint un bon rendement économique et la CAGB a récemment décidé d'étendre son amplitude géographique à l'ensemble de son territoire.

Le financement de ce projet a été assuré dans un premier temps par le PREDIT (programme national de recherche sur les transports), par une étude de faisabilité méthodologique ayant permis de dessiner les contours du service, puis par l'Institut des Sciences et des Technologies de l'Information de Franche-Comté (ISTI) qui a appuyé le transfert technologique du prototype vers un service effectif (Evolis-gare) géré par un logiciel en cours de dépôt (Resad2). Une dernière recherche nous a été confiée il y a un an par la CAGB pour évaluer la faisabilité d'extension du service. Trois thèses ont été financées entre 1998 et 2003 (ADEME, CR Franche-Comté, ANRT-Cifre).

Ce projet a connu trois phases complémentaires et imbriquées, d'environ deux années chacune : (i) la conception du système de transport, (ii) la réalisation du logiciel de gestion du TAD et le lancement du service, et enfin (iii) l'évaluation de son fonctionnement et de la faisabilité de son extension géographique. Dans notre analyse, nous avons identifié les entités selon les types de métiers : la recherche (les laboratoires et les chercheurs associés), les transporteurs (Kéolis et sa filiale) et l'organisme territorial et politique (l'Autorité organisatrice des transports). Nous les considérons de façon analogique avec les disciplines telles qu'elles ont été appréhendées dans la première partie pour le cas de la Recherche. Depuis plusieurs années, la CTB conserve la délégation de service de transport, tout d'abord de la ville de Besançon, puis de la Communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB). De ce fait, elle pratique la *pluridisciplinarité* mais dans un cadre particulier et contraignant, par le biais d'un contrat d'exploitation.

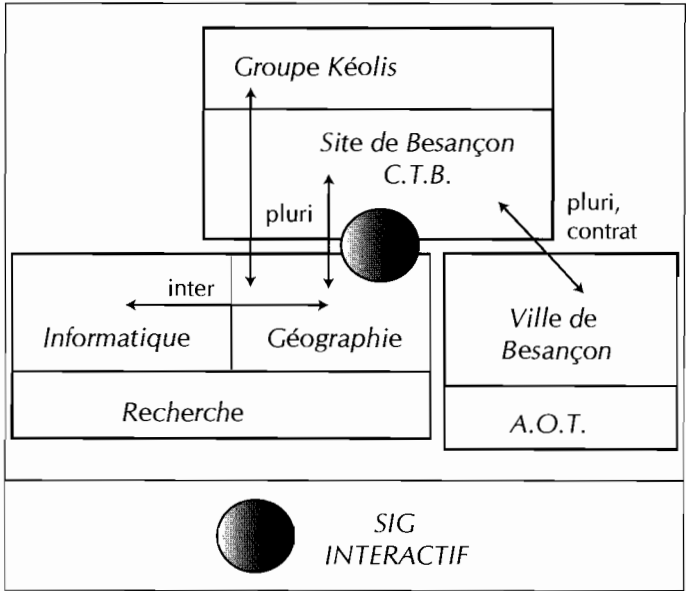
Conception du TAD Evolis-gare

La première phase peut être qualifiée de *phase de conception* (fig. 5). Elle a consisté en un état de l'art des TAD, le développement d'outils et de méthodes spécifiques pour analyser la demande et y répondre, et la préconisation des composantes du service. Elle a permis de dessiner précisément les contours du TAD Evolis-gare. Pour des raisons stratégiques, le groupe Kéolis a choisi trois sites d'expérimentation potentiels (Besançon, Dijon et Montbéliard) et un unique mode de TAD, en rabattement ou « convergence-divergence » sur un unique pôle générateur de flux (respectivement une gare, un multiplexe et une zone industrielle). L'équipe de recherche ayant été à l'initiative du projet, un premier travail relationnel a été nécessaire pour impliquer les partenaires, notamment au niveau du siège social national de Kéolis, pour qui nos travaux ne constitu(ai)ent pas une priorité. Les réserves et les distances de principe ont été rapidement réduites au sein de l'équipe de recherche (partenariat serré entre géographes et informaticiens) et entre celle-ci et la CTB (notamment grâce à la crédibilité acquise des chercheurs aux yeux des ingénieurs de la CTB). Pour l'équipe de recherche, on peut parler d'*interdisciplinarité* compte tenu de l'élaboration d'un langage commun et de l'élargissement de nos champs respectifs de connaissance et d'investigation. Ce processus nous a amené à fonder un groupe informel baptisé Tad-*avance*, spécialisé dans la géomatique appliquée à la mobilité. Pour les relations avec la CTB, il s'agit davantage de *pluridisciplinarité* due à l'émergence d'un objet à l'interface, intéressant les partenaires sous différents aspects.

Du point de vue des outils et des méthodes géomatiques, outre la constitution de bases de données géographiques, les chercheurs ont utilisé et développé des SIG interactifs. Ces outils exploratoires, relevant de la cartographie interactive (Josselin & Fabrikant, 2002) et de la statistique exploratoire (Hoaglin *et al.*, 1983) et permettant d'associer dynamiquement des cartes et des représentations graphiques et statistiques, ont notamment été le support de discussions fertiles avec les opérationnels. C'est ainsi que les dépouillements d'enquêtes ont été réalisés et que la répartition géographique et l'organisation spatiale des lignes potentielles de transport à la demande ont été imaginées (Banos, 2001). Restés au stade de prototype propriétaire (car du domaine de la recherche) pour l'aide à la décision, ces outils n'ont pas encore été intégrés dans

la palette de méthodes dont disposent les décideurs ou les transporteurs. Il reste en effet des recherches conséquentes à réaliser pour les rendre plus accessibles (aspects statistiques et graphiques) et développer leur capacité intrinsèque à produire aisément du sens pour tout individu faisant partie prenante du processus de décision.

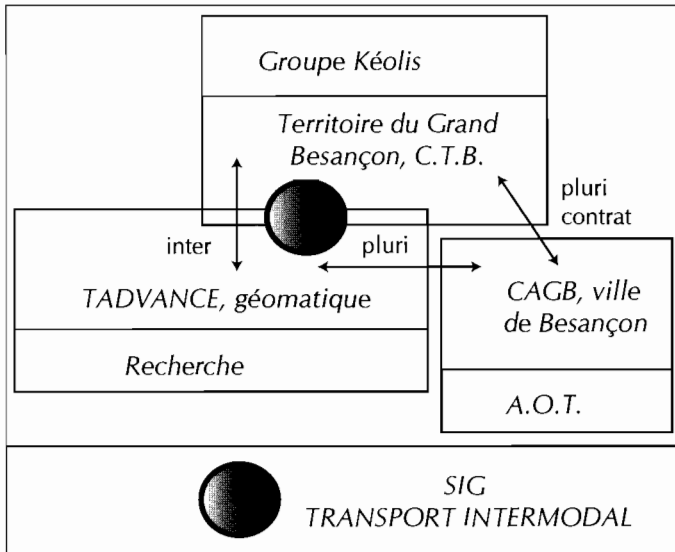
Figure 5 - Phase 1 de la mise en place du TAD Evolis-gare : conception du service



Réalisation d'un logiciel dédié à la gestion du TAD Evolis-gare et lancement opérationnel du service

Le logiciel de gestion du TAD Evolis-gare, qui est maintenant un produit opérationnel depuis 2001, constituait explicitement le dérivable principal de la recherche-action dans sa seconde phase (fig. 6). À partir des concepts de la première phase, il a été développé en 6 mois, sous une double impulsion : celle des chercheurs qui souhaitaient passer d'une phase d'expérimentation d'une semaine (réalisée à l'automne 2001) à plusieurs mois afin de disposer d'une période d'analyse conséquente, et celle des ingénieurs de la CTB qui voulaient pérenniser ce service complétant leur gamme d'offre. Très vite le groupe, constitué d'un noyau de 8 « permanents » (y compris trois doctorants très impliqués), a fonctionné en *interdisciplinarité*. Il y a eu une répartition naturelle des rôles de chacun, avec une certaine constance dans les échanges et la maintenance d'un territoire de compétence/connaissance partagé, une forte appropriation de l'objet de recherche. On a vu des binômes ingénieur/chercheur se former pour résoudre certaines questions spécifiques, d'ordre technique notamment. Le moteur n'était pas un/des individu(s) du groupe, mais bien le projet lui-même, et à travers lui, le groupe dans son ensemble, resté à dimension humaine et facilitant ainsi sa conduite. L'envie de réaliser un système fonctionnel a donc joué un rôle important en créant une certaine pression à l'efficacité du groupe et au respect des délais d'expérimentation terrain.

Figure 6 - Phase 2 de la mise en place du TAD Evolis-gare : réalisation du produit



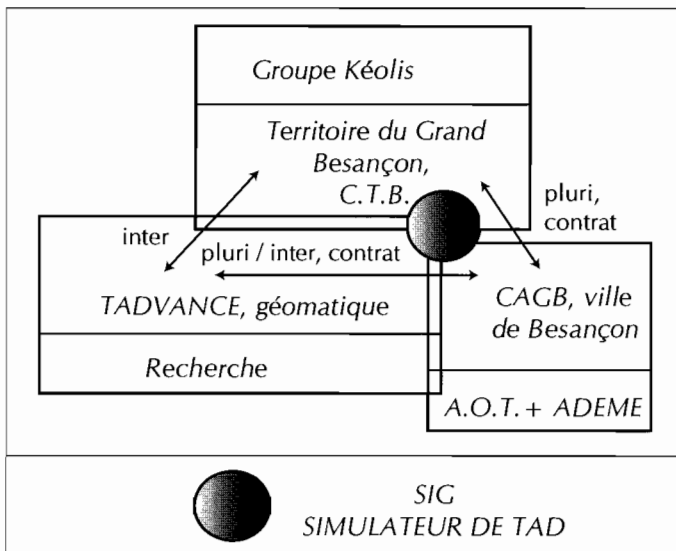
D'un autre côté, les relations avec l'autorité organisatrice (devenue la Communauté d'agglomération du Grand Besançon) se sont également amplifiées. Ainsi, la collectivité demandeuse a modifié sa voirie pour faciliter l'accès au service à la gare et a fortement soutenu la démarche de recherche-action. On est passé d'une *multidisciplinarité* à une *pluridisciplinarité* latente entre l'équipe de recherche et la CAGB.

Chaque partenaire a en définitive retiré ses fruits de cette expérience : la CTB a imaginé un service commercialement innovant en partenariat avec les taxis (sous-traitance de la réalisation des tournées), les géographes ont mis en œuvre des méthodes de modélisation, de visualisation et de gestion des bases de données géographiques (Bolot et al., 2001), les informaticiens ont créé des heuristiques et des algorithmes de desserte optimale sous contraintes temporelles et spatiales, et la collectivité a offert à ses administrés un nouveau moyen pour se rendre à la gare aux horaires de frange. Par ailleurs, le travail de l'équipe s'est concrétisé par le dépôt conjoint du logiciel Resad2, composé d'une interface de saisie des réservations, d'un noyau d'optimisation spatio-temporelle de tournées et d'un outil de géovisualisation des lignes Evolis-gare. En termes de vulgarisation, l'équipe a produit un article commun à diffusion régionale, a participé à une courte émission de télévision à heures de grande écoute, a obtenu deux prix pour le caractère innovant de la recherche³. La réalisation du SIG transport intermodal dédié aux transports à la demande (Thévenin, 2002) a constitué un projet central justifiant l'essentiel du renforcement des relations pluri/interdisciplinaires entre les partenaires et les disciplines.

Évaluation du fonctionnement du TAD Evolis-gare et de la faisabilité de son extension géographique

Le lancement du service a eu lieu avec comme partenaire institutionnel la ville de Besançon. En 2001, la compétence transport a été transférée à la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon, nécessitant l'intégration d'une population d'environ 50 000 personnes en plus (initialement 120 000 à Besançon) sur un territoire 8 fois plus vaste. La CAGB s'est donc interrogée sur la faisabilité d'extension d'Evolis-gare. Le système mis en place résistera-t'il à ces nouvelles contraintes ? Le regroupement des passagers dans les véhicules sera-t'il moins élevé ? Quel sera le rendement économique du service ? Quels seront les coûts induits ? Quelles seront les ressources nécessaires pour sa mise en œuvre pratique ? La CAGB nous a sollicité, dans le cadre d'un contrat de collaboration en partenariat avec la CTB, pour tenter de répondre à ces questions.

Figure 7 - Phase 3 de la mise en place du TAD Evolis-gare : évaluation de l'extension géographique



Si dans la précédente phase (de réalisation du logiciel et du service), l'interdisciplinarité était née d'un partenariat fort au sein de l'équipe de recherche, nous avons pu dans cette troisième phase noter l'implication plus forte de l'autorité organisatrice, et notamment de ses ingénieurs. On peut pratiquement dire que, contrairement à ce que l'on attendait (un affaiblissement des relations dû à un contrat « vertical » de collaboration), le fonctionnement est passé d'un stade de *pluridisciplinarité* à un niveau de (*quasi*-)interdisciplinarité, mais cette fois-ci en incluant 3 voire 4 partenaires. J'en veux pour preuve le fait que, d'une part, l'Agence pour le développement, l'économie et la maîtrise de l'énergie (finançant la moitié du projet à la CAGB) a participé à la plupart

³Pour plus d'information, voir <http://www.modulobus.org>

des réunions techniques, et que, d'autre part, le nombre de réunions de travail a été multiplié par deux par rapport à l'échéancier initial, réunions pendant lesquelles les orientations stratégiques ont été largement discutées.

D'un point de vue géomatique, nous avons été amenés à réaliser des bases de données géographiques cohérentes au sein de SIG, en intégrant des données propres à l'application et selon les préconisations des services techniques de nos partenaires. L'aide à la décision a fonctionné tout au long du processus, à la lumière des cartes interactives et des bases de données géographiques qui évoluaient, mais aussi des résultats des simulations réalisées. Le SIG a parfois atteint le stade de SIG participatif, dans la mesure où les partenaires, maîtrisant parfaitement le terrain, ont pu identifier des lieux (des communes, notamment) où les diagnostics produits automatiquement par le SIG posaient quelques problèmes méthodologiques. Par exemple, cette démarche a permis de répartir géographiquement, de la façon la plus pertinente possible, certains points de rencontre Evolis-gare et d'obtenir des bassins de chalandise compatibles avec le futur contrat passé avec le client (notamment concernant la durée maximale de trajet supportée par le client, y compris le temps de marche à pied pour rejoindre l'arrêt Evolis-gare).

Par ailleurs, pour évaluer la faisabilité de l'extension du service, il a été nécessaire de se projeter dans un avenir proche, en prenant en compte le fonctionnement actuel et les caractéristiques du nouveau territoire à desservir. D'une part, nous avons dû évaluer le marché potentiel compte tenu des populations communales, des structures des réseaux et de la connaissance des profils d'utilisateur d'Evolis-gare à Besançon. D'autre part, nous avons déterminé la loi statistique qui régit la fréquence de la demande dans l'espace. Enfin, nous avons simulé une cinquantaine de cas de figure du fonctionnement du système en modifiant les paramètres (changement du contrat client, capacité variable des véhicules, type de scénarios d'extension, portée spatiale du service, etc.) et en utilisant des méthodes de rééchantillonnage sous contrainte de probabilité de la demande. C'est là que se situent les retombées scientifiques principales de cette phase : l'obtention d'un simulateur de TAD en convergence-divergence pour l'aide à la décision en géomatique.

Discussion : la géomatique à travers les relations entre ses composantes et ses disciplines

Transfert des technologies SIG mises en oeuvre dans le projet Evolis-gare aux décideurs et aux transporteurs

Le logiciel Resad2 a été transféré complètement dans le monde opérationnel après sa phase de prototypage. Il fait actuellement l'objet d'une protection en vue de sa commercialisation. Une limite de ce type de fonctionnement pluri/interdisciplinaire réside dans la difficulté à redistribuer la paternité des travaux *a posteriori*. C'est un peu ce qui s'est produit lors du dépôt du logiciel où l'on a vu, contre toute attente, la collectivité territoriale demander sa participation à la répartition des droits de propriété. La logique pluridisciplinaire et le souhait partagé que la recherche progresse ont voulu que le groupe accède à cette demande. Il en a été fortifié. Dans le cadre de la loi Innovation, les partenaires ont tout d'abord cherché à faire en sorte que l'innovation soit

rachetée par une société du domaine. Puis, ils ont lancé une procédure d'incubation d'entreprise technologique qui devrait déboucher prochainement sur la création de la société GaléopSys, spécialisée dans la mise en oeuvre de SIG dédiés aux transports à la demande.

Au-delà de ces éléments factuels, l'on pouvait espérer que l'appropriation des méthodes et des outils relevant du traitement de l'information géographique pourrait permettre de faciliter l'acquisition et l'utilisation d'un SIG au sein des partenaires extérieurs à l'équipe de recherche. Dans les faits, la CTB est dotée d'un logiciel approprié, mais n'a pas encore implanté complètement les bases de données construites par les chercheurs à partir de toutes les données sources, encore moins les outils interactifs ou les simulateurs proposés. Cette société préfère se concentrer sur son métier (transporter de clients) plutôt que d'intégrer des compétences nouvelles d'analyse spatiale. Il en est de même pour les autorités organisatrices, qui ont toutefois repris les données géographiques modifiées et complétées à la suite des phases 2 et 3 du projet. Les SIG spécifiquement développés pour l'analyse des systèmes de transport à la demande n'ont ainsi servi que de vecteurs de connaissance et d'aide à la décision.

Apport du projet Evolis-gare à la recherche en géomatique

Pour ce qui concerne le projet Evolis-gare, les retombées scientifiques apparaissent globalement inégales. Elles ont été relativement importantes et rapides dans la discipline des Sciences de l'Homme et de la Société, la géographie en l'occurrence, car le projet se positionne bien à l'interface homme/territoire/technologies, fournissant notamment de nombreux articles et trois thèses (dont une en cours de finition). Pour ce qui est de l'informatique, le projet nous a amené à revisiter les classiques algorithmes de parcours de graphe, auxquels ont été ajoutées de nouvelles fonctions, notamment sur les marges temporelles, pour optimiser les tournées. Après un délai de 2 ans, le projet a permis de développer le concept innovant d' « arbres recouvrants tentaculaires » (Canalda et al., 2004). On voit bien ici toute la difficulté de la recherche-action : comme une partie importante de l'énergie se focalise sur l'application, la publication devient une issue aléatoire, incertaine car indirecte. Pour la géographie comme pour l'informatique, les publications sont forcément moins nombreuses au regard des moyens mis en oeuvre pour développer la recherche en question.

Concernant les relations entre les disciplines, nous pouvons dégager trois éléments intéressants. D'une part, l'existence de contrat crée un lien directionnel entre le mandat et le mandaté qui limite malgré tout l'implication du demandeur/financeur, et qui ne permet que d'effleurer occasionnellement un niveau de relation interdisciplinaire (cas de la troisième phase de l'expérience Evolis-gare). D'une certaine façon, cela constitue un effet pervers puisque la part de l'investissement consenti reste essentiellement financière, freinant un apport complémentaire qui pourtant serait largement bénéfique.

D'un autre côté, lorsque ce lien contractuel n'existe pas entre les partenaires, ceux-ci participent plus facilement au projet, parce qu'une demande sociale parfois externe les y incite et que les moyens le permettent. C'est par exemple la position de la CTB, qui n'a jamais été financée directement comme prestataire, mais qui l'a été de façon

annexe ou à travers sa dotation globale. Une autre raison vient du fait que le statut de recherche-action permet aux chercheurs, dans le cadre d'un contrat de collaboration, de conserver leur droit à l'erreur (obligation de moyens et pas de résultats). Dans ce cas, il paraît plus aisé d'atteindre un fonctionnement interdisciplinaire qui requiert une certaine liberté d'investigation dans le temps imparti.

Enfin, si pour l'ensemble de phases traitées du projet, les objectifs ont été de notre point de vue atteints voire dépassés, il n'en demeure pas moins que, dans l'expérience relatée, mais également dans toutes celles auxquelles nous avons pu participer, nous n'avons jamais pu atteindre la *transdisciplinarité*. Cette dernière nécessite une liberté intellectuelle et d'action totales, et même si elle incarne un idéal de fonctionnement et de liberté d'esprit, elle semble quasiment inaccessible dans des recherches où il existe la moindre contrainte terrain. Elle relève peut-être davantage de l'épistémologie et de la philosophie et fait appel à des chercheurs possédant des capacités rares de mise en perspective et en résonance des questions scientifiques transversales aux disciplines.

La géomatique : une metadiscipline ?

La question est de savoir si, notamment en France, la géomatique peut atteindre le statut de métadiscipline, et, à travers cette évolution, obtenir une reconnaissance officielle qui pourrait se traduire, comme dans certains pays tels que le Canada, par la création de centre de recherches en géomatique.

Parmi les nombreuses définitions de la géomatique, nous en retiendrons une qui a l'avantage d'en présenter une double acception, à savoir « une analyse spatiale pour laquelle l'ordinateur joue un rôle déterminant dans la procédure de recherche » mais aussi « l'ensemble des utilisations techniques de l'informatique en géographie » (Lévy & Lussault, 2003).

Cette duplicité de la géomatique la place dans une situation paradoxale. D'un côté, elle favorise la pluridisciplinarité car ses composantes ont l'opportunité de se focaliser ensemble sur un (ou des) objet(s) commun(s). À l'opposé, son ambivalence rend délicate l'interdisciplinarité et quasiment impossible la transdisciplinarité, car, comme nous l'avons évoqué, l'association des métiers proches du terrain et de la demande sociale avec les disciplines scientifiques n'offre pas les conditions idéales d'une relation profonde entre les différents protagonistes dans les projets. Toutefois, force est de constater que de nombreuses études s'appuient sur les SIG pour développer des recherches pluri/interdisciplinaires en prise avec la demande sociale (voir par exemple: Chappuis & De Golbery, 2000, Lardon et al., 2001, Le lay & Clergeau, 2001, Caquard, 2003). C'est bien la preuve de la vivacité des relations entre les disciplines de la géomatique.

Par ailleurs, il semble que deux évolutions notables de la géomatique se soient produites ces dernières années. D'une part, la géomatique est passée d'un statut technique hyperspécialisé à un domaine très large et reconnu. Par exemple, les logiciels de calcul d'itinéraires ou les GPS embarqués dans les véhicules ont rapproché les individus de l'information géographique numérique. L'émergence de nombreuses nouvelles collectivités territoriales (pays, communautés d'agglomérations) à la faveur des lois d'aménagement du territoire a changé le rapport des institutions aux bases de données

géographiques et a facilité l'intégration des SIG comme logiciels de base, presque au même titre que les outils de bureautique. Cette évolution induit une certaine diffusion des concepts de la géomatique qui génère un nouveau paradoxe. À une augmentation de la portée de la géomatique, facilitant la création potentielle d'une métadiscipline, s'oppose une dilution de ses savoir-faire rendant ses limites floues et affaiblissant sa cohérence et son identité.

Parallèlement, en dépit d'une croissance du marché des SIG et de périodes fastes passées (par exemple, la diffusion des méthodes d'analyse multicritères : Roy, 1993), nous ressentons actuellement dans nos expériences un relatif désintérêt des décideurs pour la carte en général et, plus précisément, pour des systèmes voués, dans un processus de décision, à favoriser la mise en exergue des enjeux et des points de vue sur le territoire. Il semble également que les velléités de partage de l'information géographique, en dépit des avancées considérables des technologies de l'information pour internet, se soient quelque peu affaiblies. Tout se passe comme si l'information géographique avait été réduite essentiellement à sa production, à sa gestion et à son exploitation en documents de synthèse, par des systèmes dédiés dans certains services d'organismes ayant fait l'acquisition de SIG, ou bien externalisée à des structures privées ou universitaires à même de développer les compétences requises. On est bien loin de la généralisation de l'utilisation de SIG participatifs permettant aux grands organismes de fédérer et de promouvoir leurs actions, en associant leurs services internes autour de l'outil. Pourtant, une telle approche contient les germes d'une interdisciplinarité poussée (voire de la transdisciplinarité ?) qui manque encore à la géomatique pour faire d'elle une métadiscipline.

Au delà de l'outil, certaines thématiques de recherche de la géomatique pourraient constituer des ancrages forts dont a besoin la géomatique pour renforcer sa visibilité et son identité. À titre d'exemple, un groupe de travail de l'association européenne de développement de l'information géographique (AGILE), (Wachowicz & Hunter, 2003) développe actuellement des recherches dans le domaine de « l'utilisabilité » des données spatiales ("*spatial data usability*"). Ce groupe situe sa réflexion à l'interface entre les données décrivant l'espace géographique, les utilisateurs/producteurs de ces informations, les méthodes et les outils qui leurs sont associés (statistiques, géovisualisation, SGBD Géographique, etc.). Il regroupe les différents métiers de la géomatique. C'est bien dans ce vivier d'organismes et de compétences que se trouvent les partenaires des projets pluri/interdisciplinaires en géomatique. C'est aussi là que peut-être l'on posera des questions réellement transversales et capables de déplacer la « problématique géomatique » à un niveau plus englobant.

Un second exemple est celui de la problématique ontologique, qui regroupe plusieurs courants de pensée et différents domaines scientifiques. Son spectre couvre notamment la métaphysique (théorie de l'être), la linguistique qui traite des questions du statut de réalité des entités constituant le référent du discours scientifique (Dictionnaire de Philosophie, 2000), les sciences abordant la construction de discours issus de la logique mathématique (Larousse). Dans le domaine de la géomatique, les ontologies spatiales constituent des représentations structurées et des modèles d'abstraction du monde réel, dont la connaissance et la formalisation visent notamment à améliorer

l'interopérabilité entre les systèmes, via par exemple les métadonnées (Giger & Najar, 2003). On constate dans ces approches leur point commun mais aussi les différents niveaux d'abstraction. À titre d'exemple, une recherche approfondie mêlant des philosophes, des linguistes, des informaticiens et des praticiens ne pourrait-elle pas générer des questions de géomatique transcendant les disciplines, accédant ainsi à la transdisciplinarité ?

En guise de conclusion...

Nous avons recensé quels pouvaient être les différents niveaux de relation entre les disciplines, et ce qu'ils impliquaient comme formes d'échange et d'ouverture vers des questions scientifiques transversales. Nous avons ensuite replacé cette analyse dans un contexte pragmatique d'acteurs et d'informations. À la lumière d'une application dans le domaine des transports à la demande que nous avons passée au crible, sont apparus les limites et les difficultés, les avantages et les sources de la pluridisciplinarité et de l'interdisciplinarité dans le déroulement d'une recherche-action en géomatique. Ces deux approches complémentaires nous ont permis d'ouvrir une discussion sur l'intérêt et la pertinence de l'existence d'une métadiscipline incarnée par la géomatique. Nous disposons de différents leviers pour aider à sa création : par les projets, par les organismes, par les groupes. À nous de les activer pour donner à la géomatique un nouveau statut. La discussion reste ouverte...

Bibliographie

- ABRIC J.-C. *Psychologie de la communication. Théories et méthodes*. Cursus. Paris : Armand Colin, 1999
- AMBLARD F. & FERRAND N. *Modélisation multi-agents de l'évolution de réseaux sociaux*. Colloque SMAGET : Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires, Clermont-Ferrand, 5-8 octobre 1998, Cemagref Editions : Antony, 2000, p. 153-168.
- ANDLER D. (Ed.). *Introduction aux Sciences Cognitives*. Essais. Paris : Folio, 1992.
- BANOS A. *Le lieu, le moment, le mouvement : pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain*. Thèse de Géographie. Université de Franche-Comté. Besançon. 2001.
- BOLOT J., JOSSELIN D., THEVENIN T. *Responsive Demand Transports in the Mobilities and Technologies Evolution*. Context, concrete Experience and Perspectives. Proceeding of the 5th AGILE Conference, Palma, 25-27 Avril 2002. p. 331-338
- BOURGUIGNON A. *De la pluridisciplinarité à la transdisciplinarité*. Congrès de Locarno, 30 avril – 2 mai 1997. Annexes au document de synthèse CIRET-UNESCO.
- CANALDA P., CHATONNAY P., JOSSELIN D. *Énumération d'arbres couvrants tentaculaires, une solution au problème de transport à la demande en convergence*, IEEE Conference SETIT'2004, March 2004, Tunisia, 8 p.
- CAQUARD S. *Évolution cartographique et participation publique. Un prototype de cartes multimedias pour la gestion de l'eau*. *Revue Internationale de Géomatique Cartographie animée et interactive*, Vol 3, n°1/2003 (Eds. D. Josselin, S. Fabrikant). Paris : Hermès, Lavoisier, 2003. p. 15-27.

- Charte de la Transdisciplinarité. *Transversales, Sciences, Culture*. N° 31, 1995. p. 4-5.
- Dictionnaire de Philosophie*. Encyclopédie Universalis. Paris : Albin Michel, 2000.
- GIGER C. & NAJAR C. Ontology-based integration of data and metadata. *AGILE 2003, Proeedings of the 6th AGILE Conference on Geographic Information Systems*, (Ed. Gould, Laurini, Coulondre), Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Formation continue : Lausanne, 2003, p. 586-594.
- HOAGLIN D., MOSTELLER F. & TUKEY J.W. *Understanding robust and exploratory data analysis*, Series in probability and mathematical statistics, New-York: Wiley, 1983.
- JOSELIN D., FABRIKANT S. (Eds). N° spécial « cartographie animée et interactive », vol. 13, n°1/2003, CNRS-NCGIA, *Revue Internationale de Géomatique*, Paris : Hermès, Lavoisier, 2003.
- LARDON S., MAUREL P., PIVETEAU V. (Eds). *Représentations spatiales et développement territorial*. 2001, Paris : Hermès Science.
- LE LAY G. & CLERGEAU P. Une démarche cartographique pour la gestion de la faune sauvage à l'échelle du paysage. *Revue Internationale de Géomatique*. SIG et développement du Territoire. Vol 11, n°3-4/2003 (Eds. M. Thériault, R. Prélaz-Droux). Paris : Hermès, Lavoisier. p. 423-442.
- LEVY J. & LUSSAULT M. (Eds.). *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Paris : Belin, 2003.
- MORIN E. Réforme de pensée, transdisciplinarité, réforme de l'Université. *Bulletin Interactif du Centre International de Recherche et Etudes Transdisciplinaires*. N° 12. Février 1998. 7 pages.
- MORIN E. Sur l'interdisciplinarité. *Bulletin Interactif du Centre International de Recherche et Etudes Transdisciplinaires*, n° 2, Juin 1994. 7 pages.
- NICOLESCU B. *La transdisciplinarité*. Manifeste. Paris : Rocher, 1996.
- ROY B. BOUYSSOU. D. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Paris : Economica. Collection Gestion. 1993.
- THEVENIN T. *Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains, une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisontine*. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté, 2002.
- VON BERTALANFFY L. *Théorie Générale des Systèmes*. Paris : Dunod, 1973.
- WACHOWICZ M. & HUNTER G.J. Preface to Special Section on Spatial Data Usability *Codata, Data Science Journal*. Special Section on Spatial Data Usability http://journals.eecs.qub.ac.uk/codata/Journal/contents/2_03/2_03.html. 2003. p. 75-78.

Les SIG dans les sciences environnementales et appliquées

Essai de délimitation de la partie terrestre du littoral à l'aide d'un SIG : Application à la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie)

Pascal DUMAS, IRD Nouvelle-Calédonie, France
Jean-Marie FOTSING, Université d'Orléans - IRD Orléans, France
Gilbert DAVID, Saint-Denis de La Réunion, France
E-mail : Pascal.Dumas@noumea.ird.nc

Résumé : Le littoral de par sa double composante maritime et terrestre est un espace complexe difficile à délimiter. Au-delà des multiples définitions et de la polysémie du concept, cette communication tente de définir la partie terrestre de ce système spatial à partir de cinq paramètres susceptibles d'éclairer une démarche rigoureuse de délimitation géographique utilisant les SIG. Dans ce sens, ont été retenus : le critère topographique représenté par le descripteur rupture de pente ; le critère démographique au travers de la densité de population et des implantations humaines en relation avec la distance au trait de côte ; le critère de distances institutionnelles au rivage et le descripteur paysager fondé sur la couverture végétale observée sur les images satellites. Toutes ces données, ramenées à une référence cartographique commune et regroupées dans un système d'information géographique sont testées pour expérimenter la pertinence des critères retenus afin de définir une limite au littoral de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie.

Mots clés : littoral, paysage, descripteur, limite, télédétection, SIG, Nouvelle-Calédonie.

Test of delimitation of the terrestrial part of the coastal zone using a GIS : Application to the Grande Terre (New Caledonia)

Abstract: The coastal zone, due to its dual marine and terrestrial nature, is a complex and hard to delimit space. Beyond multiple definitions and the polysemy of the concept, this presentation attempts to define the terrestrial part of the spatial system from 5 parameters which could allow a clear approach for geographical delimitation using GIS. In this regard, the selected parameters were: topography, represented by slope change; demography through population density and human settlements in relation to the distance to the coastline; the criterium of institutional distances to shore and the landscape descriptor based on vegetation cover compiled from satellite imagery. All these data, converted to a common geographical reference and gathered within a Geographical Information System are tested to experiment the consistency of the selected criteria in order to define a limit for the coastal zone of the "Grande Terre" of New Caledonia.

Key words: littoral, landscape, descriptor, limit, remote sensing, GIS, New-Caledonia

Introduction

Partout dans le monde et plus particulièrement dans les îles de la zone intertropicale, le littoral est aujourd'hui soumis à une pression anthropique croissante et à de nouveaux enjeux économiques et environnementaux (Corlay, 1998) qui nécessitent que soit mise en place une gestion intégrée afin de limiter les conflits d'usages potentiels (Catanzano et Thiébaud, 1995). Les littoraux océaniques n'échappent pas à cette évolution (David, 1994). C'est l'une des raisons pour lesquelles la Nouvelle-Calédonie a été choisie par l'IRD (Institut de Recherche pour le développement) pour y développer un programme d'appui à la gestion intégrée du littoral. Ce dernier est considéré comme un système spatial dont il convient de décrire et d'analyser la structure et le fonctionnement. Comme pour tout système, l'étape préalable à cette étude consiste à identifier et individualiser le système de son environnement. Voilà posée la question récurrente des limites du littoral, thème si complexe que les géographes traitant des littoraux préfèrent généralement l'éviter. Ainsi est-il symptomatique de constater que sur les dix ouvrages récemment publiés en France sur les littoraux aucun n'aborde le problème de leur délimitation.

En s'intéressant à la délimitation de la partie terrestre du littoral, nous nous attachons particulièrement à la seule différenciation littoral/intérieur des terres. Entourée de toute part par l'océan, l'île est un objet géographique fini et borné qui, à ce titre, facilite une telle différenciation. La présente communication traite de l'emploi du SIG comme outil de zonage et de son apport à la détermination des limites terrestres de l'espace littoral, au sens d'écosystème complet sur la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie. Elle s'articule en quatre parties. La première rappelle le caractère polysémique du concept littoral et souligne le flou de ses limites. La seconde, après avoir brièvement présenté le cadre géographique de l'étude, propose une définition du littoral sous forme d'hypothèse de travail. La troisième détaille la méthodologie et les étapes d'intégration et de croisement des critères et descripteurs retenus pour infirmer ou valider cette hypothèse ; les résultats étant présentés en quatrième partie.

Le littoral un concept polysémique aux limites floues

Le *Larousse de la langue française* (1977) définit le littoral comme une étendue de pays le long des côtes qui appartient au bord de la mer. Pour *Le Grand Robert* (1986) le terme littoral englobe « tout ce qui appartient et qui est relatif à la zone de contact entre la mer et la terre », étendue que J. J. Bavoux (1997) assimile à un « ruban à géométrie très variable » soulignant ainsi la subjectivité et les difficultés d'en tracer les limites. Pour B. Coutts (1989) la tâche est d'autant plus difficile que « la zone côtière n'existe pas en tant qu'entité mesurable et clairement définie mais comme une idée, un concept d'un espace où la terre et la mer se confondent » (traduction de G. David). Pourtant ce concept n'est pas si dénué de matérialité. Aussi, pour reprendre les classiques, E. De Martonne (1909) dans son *Traité de géographie physique*, souligne-t-il que « sur le terrain, il apparaît clairement que le domaine littoral comprend tout ce qui, soit au dessous, soit au dessus du niveau moyen des eaux, est soumis à l'action des forces

responsables du tracé de la côte et de ses changements ». De la sorte, le vent et les embruns qu'il transporte seraient-ils des vecteurs imprimant à la végétation la marque du littoral ?

C'est bien ce qu'observent les botanistes. Ainsi, K.D. Marten (1985) considère que pour les îles hautes d'Océanie, « la composition floristique de la forêt est déterminée par l'altitude, la distance au bord de mer et par le sol sur lequel elle repose ». Ces critères confèrent à l'ensemble de la plaine côtière et aux vallées qui y débouchent une indéniable unité géographique. Il est donc inutile de chercher des distinctions au sein de cet ensemble, qui s'oppose nettement à l'unité géographique des collines de piedmont, qui sont un autre monde. Cette définition est particulièrement riche car elle permet de circonscrire le littoral par la combinaison de trois paramètres. En revanche, elle omet une composante essentielle : l'homme car sur l'ensemble de la planète, le littoral est aujourd'hui un « littoral d'œkoumène » (Bousquet, 1990), celui où vivent les hommes qui le façonnent, le gèrent, l'utilisent et le modifient. Dans ce sens, le littoral est aussi un littoral d'institutions, un cadre de vie à la fois naturel, humain, juridique et économique.

Cadre de l'étude et hypothèse de travail

Située au nord du tropique du Capricorne, la Nouvelle-Calédonie fait partie de l'ensemble mélanésien, sous-groupe qui, avec la Polynésie et la Micronésie, constitue l'Océanie. Troisième île du Pacifique par sa superficie après la Papouasie Nouvelle-Guinée et la Nouvelle-Zélande, la Nouvelle-Calédonie est située au sud de la Mélanésie entre 20° et 22° 30' de latitude Sud et 164° et 167° 30' de longitude Est (fig.1). D'une superficie totale de 18 575 km², l'archipel est constitué de « la Grande Terre » grande comme deux fois la Corse, des quatre îles Loyauté (Lifou, Maré, Ouvéa, Tiga), de l'archipel des Belep, de l'île des Pins et de quelques îlots lointains.

La Grande Terre est une bande d'environ 400 km de long sur 40 à 70 km de large, traversée du nord au sud par une chaîne montagneuse qui culmine à 1 628 m au Mont Panié (Cappechi, 1994). Cette île étroite et montagneuse est encerclée par des formations coralliennes de type barrière, d'une superficie de 8 000 km². Ce complexe récifal de très grandes dimensions, le deuxième du monde en importance, délimite un lagon de 24 000 km².

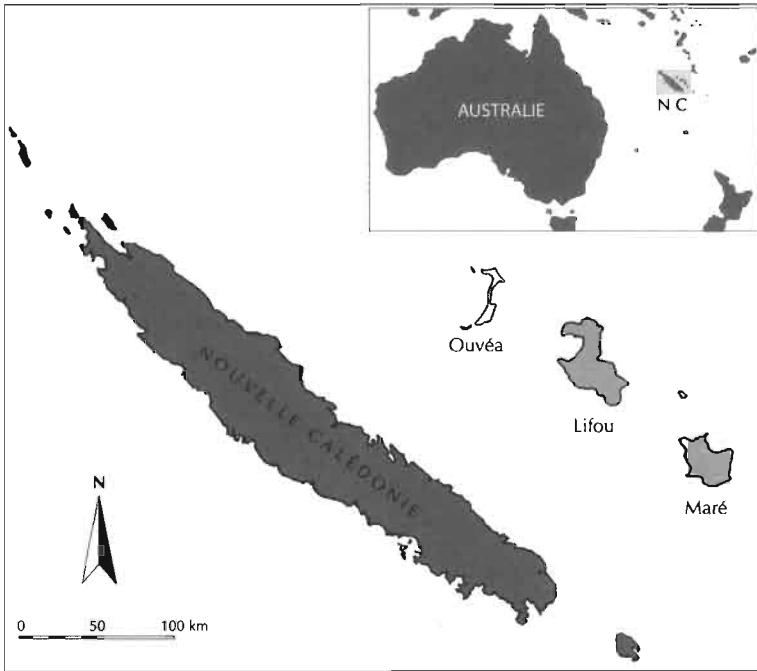
La chaîne centrale coupe l'île en deux régions distinctes :

- la côte est exposée aux alizés est la région la plus humide et la plus chaude. Une végétation plus dense y couvre les pentes abruptes.
- la côte ouest plus découpée avec des plaines propres à la culture et à l'élevage surplombées par des massifs riches en minerais.

Avec moins de 215 000 habitants d'après les estimations de 2002 et une densité moyenne d'environ 11 hab. au km², la Nouvelle-Calédonie reste très peu peuplée. L'importance d'un *domaine montagnard* difficile à aménager, explique que la plus grande partie de la population vit près des côtes. Mais malgré ce faible

poinds démographique, les littoraux calédoniens font l'objet d'une utilisation de plus en plus diversifiée et intensive : tourisme, aquaculture, pêche (Le Guen et David, 1998 a et b).

Figure 1 - Carte de situation de la Nouvelle-Calédonie



Dans le cadre de cette étude, nous avons considéré que le littoral est un espace combinant plusieurs attributs : la topographie (T), la végétation naturelle (V) corellée à la topographie ainsi qu'à la distance au bord de mer et au sol (Marten, 1985), la population (P), l'institutionnel (I) et l'occupation du sol (O). De la sorte, le littoral (L) peut s'exprimer sous la forme d'une équation qui se décline par la formule suivante : $L = f(T, V, P, I, O)$. Chacun de ces critères est défini par un ou deux descripteurs ou paramètres spécifiques, notamment l'altitude et la pente pour la topographie ; la densité et la distribution spatiale pour la population, la distance arbitraire et la distance juridique des « pas géométriques du roi » pour l'institutionnel... Le littoral peut ainsi être délimité par un de ces critères ou par la combinaison de plusieurs d'entre eux. Cette limite, équivalant à une discontinuité spatiale, est alors assimilée à un seuil ou à une rupture dans la distribution statistique d'un ou de plusieurs paramètres ou par la combinaison de plusieurs d'entre eux.

Le protocole d'étude qui va suivre relève de la démarche analytique. Celle-ci consiste à représenter et analyser la pertinence de chaque critère de définition mis en évidence dans l'équation précédente. Les paramètres de délimitation sont alors testés un à un puis deux à deux au moyen de combinaisons et requêtes rendues

possibles par l'intégration de l'ensemble des données dans un SIG. L'application de la méthode développée dans cette communication a été faite sur la Grande Terre de l'archipel néo-calédonien où seule l'occupation du sol n'a pas été testée de la même façon que les autres critères géographiques. Elle le sera dans la suite du projet de recherche.

Matériels et méthodes

Inventaire des données utiles

Pour évaluer la pertinence des critères de délimitation précédemment retenus, nous nous sommes appuyés sur diverses données issues de plusieurs sources. Ces données spatialisées peuvent être classées en deux rubriques : les données géographiques de base et l'imagerie satellitale.

Les données géographiques et socio-économiques

Elles comprennent :

- le trait de côte de la Grande Terre numérisé par la DITTT (Direction des infrastructures de la topographie et des transports terrestres) à partir des cartes topographiques IGN au 1/ 50 000 ;
- les courbes hypsométriques de l'ensemble de l'île au pas de 50 m, digitalisées par le service des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie à partir des cartes topographiques IGN au 1/ 50 000 ;
- la localisation des 231 tribus et l'implantation des 33 agglomérations de l'île principale ;
- les données démographiques du dernier recensement de 1996 réalisé par l'INSEE (Institut de la statistique et des études économiques) de Nouvelle-Calédonie ;
- les cartes topographiques IGN au 1/ 50 000 numérisées.

Toutes ces informations ont été géoréférencées (projection UTM 58 Sud, WGS 72) et intégrées dans un système d'information géographique sur l'ensemble de la Grande Terre. Cette base de données spatialisées est pilotée par le logiciel SIG Arcview® dans lequel sont intégrés les modules d'analyse spatiale et de modélisation 3D (Spatial Analyst® et Surface 3D®). Par ses fonctionnalités d'intégration de données hétérogènes (en mode vecteur ou « raster »), aux formats distincts, et d'actualisation rapide de celles-ci, le SIG nous est apparu comme un outil dynamique très intéressant pour tester nos paramètres de délimitation du littoral terrestre. Par ailleurs, ses capacités d'analyse des données à différentes échelles nous permettent une véritable approche globale du territoire étudié.

L'imagerie satellitale

L'imagerie satellitale a aussi été utilisée dans cette recherche, notamment pour servir de référentiel cartographique sur lequel toutes les autres couches d'information sont replacées dans une perspective géographique spatialisée. La vision synoptique

et globale fournie par l'image satellitaire nous permet de bénéficier d'un point de vue élevé sur les objets et d'accéder plus aisément aux caractéristiques de l'espace étudié. Ainsi, la vision synthétique qu'elle offre de l'espace observé nous aide à mieux comprendre les interactions entre les divers éléments composant le paysage. Ainsi, l'image télédéteectée est utilisée comme référentiel de synthèse du fait de son caractère intégrateur d'informations diverses.

Dans ce sillage, nous avons utilisé des images à haute résolution spatiale fournies par le capteur ETM du satellite Landsat 7 ayant une résolution spatiale de 30 m et couvrant chacune près de 35 000 km². Ces images ont été géométriquement corrigées en référence aux cartes topographiques afin d'être calées aux autres sources d'informations disponibles. Au total quatre scènes Landsat 7 acquises en 2000 et couvrant une grande partie de la zone d'étude ont été intégrées à la base de données spatialisées. Pour chaque scène, nous avons enfin élaboré des compositions colorées trichromes après rehaussement du contraste et amélioration des données de base. C'est à partir de ces images synthétiques que nous avons conduit l'interprétation analogique en relation avec les paramètres de délimitation du littoral au travers du SIG.

Méthodes et tests des paramètres

Les limites des institutions

D'une manière générale les institutions génèrent deux types de limites :

- des limites juridiques ou réglementaires destinées à réguler les usages sur le littoral ;
- des limites techniques ou administratives utilisées par ailleurs dans le traitement statistique des données.

Ainsi la population du littoral peut-elle être recensée sur une base communale comme l'ensemble des habitants des communes ayant une façade maritime ? Sur une base infracommunale, qui est la plus petite entité administrative qui soit, la discrimination de la population littorale relève souvent de l'application d'une distance arbitraire au rivage. Ainsi à Vanuatu, la limite des 2 km a-t-elle été utilisée pour distinguer la population du littoral de celle de l'intérieur des terres (Cillaurren et al., 2002).

Ainsi donc, le choix d'une limite aléatoire pour définir l'étendue de la zone côtière répond le plus souvent à des besoins de planification et de gestion du territoire. C'est dans cette optique qu'une distance arbitraire de la ligne de côte est alors fixée pour permettre d'établir un cadre d'analyse au travers duquel les décisions et mesures seront effectuées.

Dans le cas de la Nouvelle-Calédonie, nous avons ainsi fixé une limite à 5 km du trait de côte pour la Grande Terre. Pour circonscrire et cartographier cette zone à l'aide du SIG, nous avons créé un corridor (aussi appelé zone de *buffer*) autour du trait de côte. Cette option permet de produire des zones d'égalles distances autour d'un objet sélectionné (point, ligne, polygone). Ce critère « distance au rivage » peut aussi s'exprimer à travers un descripteur juridique. En Nouvelle-Calédonie, le rivage est prolongé vers l'intérieur par une réserve domaniale dite zone des 50 pas géométrique ou

« pas du roi » d'une largeur de 81,6 m, à partir de la limite supérieure du rivage, aussi appelée zone marine. Cette zone qui est rattachée au Domaine Public Maritime, correspond à la seule délimitation terrestre juridique du littoral. Pour cartographier cette limite, la même opération décrite précédemment a été adoptée.

Limites de l'emprise humaine

Deux types de limites ont été testées : la distribution géographique de la population de Nouvelle-Calédonie et sa densité. Dans un cas comme dans l'autre, nous nous sommes appuyés sur les données du dernier recensement de l'INSEE de 1996 d'après lesquelles la population de Nouvelle-Calédonie s'établissait à 196 800 habitants.

Dans un premier temps, nous avons analysé la distribution spatiale des centres urbains et des tribus, où vit la population kanak en zone rurale (Arréghini et Warrier, 1993). Au total 231 tribus de la Grande Terre et 31 chefs lieux communaux ou agglomérations que l'on pourrait plutôt classées entre petits hameaux et gros villages (leur poids démographique n'excédant que rarement 2500 habitants, seuil minimum d'urbanité en Métropole) ont été pris en compte. La distance séparant les agglomérations (où se concentre la quasi-totalité de la population communale hors population tribale) du trait de côte a été calculée. Cet exercice a ensuite été répété avec les entités géographiques « tribus » en utilisant les capacités analytiques standards du SIG, notamment les calculs d'optimisation relatifs d'une part à l'analyse des réseaux qui peuvent déterminer le chemin le plus court d'un point à un autre et d'autre part, aux fonctions topologiques et métriques permettant la recherche d'objets géographiques situés à une certaine distance d'un point, d'une ligne ou d'une surface. Certes il aurait été préférable de calculer le chemin optimal devant passer par plusieurs points, en suivant par exemple le réseau de communication pour calculer la distance réelle à parcourir pour joindre un point à un autre en fonction des contraintes physiques du milieu et des accès possibles. Mais l'objectif était d'obtenir un ordre de grandeur des distances séparant les lieux de vie de la côte, afin de mesurer l'occupation humaine du littoral et de tester la pertinence de critère pour sa délimitation.

Dans un deuxième temps, pour mieux apprécier la distribution de la population sur le territoire néo-calédonien et particulièrement sur la franche littorale, nous avons réalisé des cartes de densité lissée de la population à partir de données ponctuelles. Cette interprétation est d'autant plus juste que la population néo-calédonienne se concentre exclusivement au sein des tribus et des petites villes de tailles modestes à l'exception de l'agglomération urbaine du Grand Nouméa. Sur la côte Est, cette distribution spatiale de la population est pleinement vérifiée alors que sur la côte ouest il est à noter que l'habitat est tout de même plus diffus.

Ces densités de population lissées ont été calculées sous l'extension Spatial Analyst d'Arcview® qui permet de représenter les occurrences d'une quantité mesurée par unité de superficie (cercle dont on peut déterminer le rayon). La densité pour chaque cellule est calculée en additionnant les valeurs du champ de population pour chaque point trouvé dans le rayon de recherche, puis en divisant le résultat par la surface du cercle et en l'exprimant dans l'unité de superficie.

Les limites de la végétation naturelle

À partir des images satellites Landsat 7, nous avons identifié les limites de la végétation naturelle se développant sur la plaine côtière (végétation clairsemée et herbeuse) qui se distingue nettement de la végétation présente sur les versants de la Chaîne Centrale (maquis minier). Cette différenciation a été faite par approche analogique fondée sur l'interprétation visuelle des compositions colorées trichromes. Notre choix a porté sur des compositions du type TM3, TM2, TM1 car elles offrent une facilité d'interprétation du fait que les couleurs résultantes sont très proches de celles des photographies aériennes vraies couleurs et donc de la réalité de terrain. À partir de ces images, les thèmes d'occupation des sols ont été répertoriés et définis par combinaison de trois critères images (couleur dominante, texture et structure). Il s'agissait principalement d'apprécier s'il était possible, au travers des configurations spatiales télédéteectées (couverture végétale et occupation du sol associée) de différencier l'espace littoral du reste du territoire insulaire et ceci à l'échelle de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie en se fondant sur l'extension spatiale du couvert végétal mise en évidence sur les images satellites.

Les limites topographiques

Rappelons que la Grande Terre est une île haute formée d'un rivage et d'une montagne et donc comprenant un système littoral et un système montagnard. Pour pouvoir fixer une limite terrestre du littoral, il faut déterminer un seuil permettant de distinguer ces deux systèmes. Pour cela, nous avons retenu le facteur topographique représenté par ses variables altitude et pente qui indiquent une certaine homogénéité de formes et de modelés et un étagement des formations végétales. Par ailleurs, la corrélation entre la végétation et la topographie est aisément visible sur l'image télédéteectée.

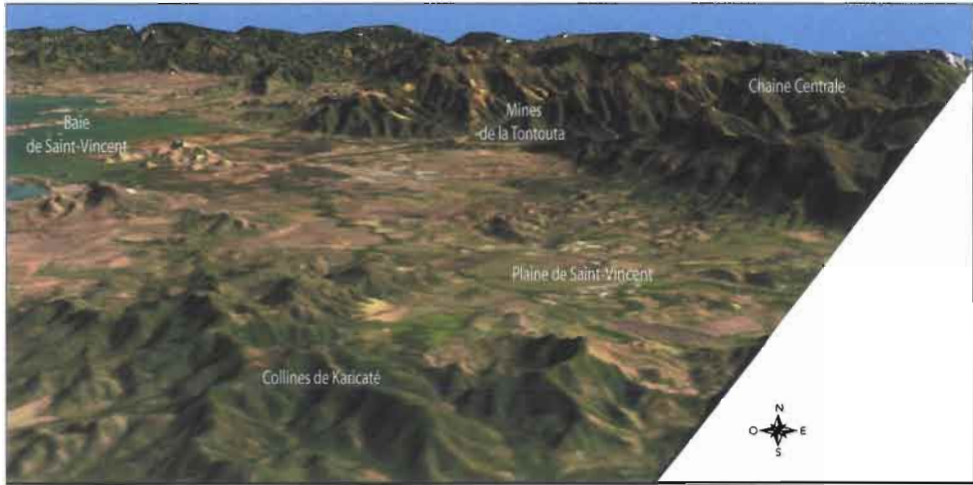
À partir des courbes hypsométriques, au pas de 50 m, nous avons réalisé un modèle numérique de terrain (MNT) qui fournit des renseignements non seulement sur les formes de relief mais également sur leur position. Il a été réalisé grâce au module Spatial Analyst d'Arcview®, qui permet de modéliser, d'analyser et d'afficher des surfaces sous formes de facettes triangulaires 3D (*Triangulated Irregular Network*) calculées à partir d'un semis de points cotés. La plupart des SIG gérant aisément des informations de ce type, nous avons pu ainsi modéliser la distribution spatiale de la zone littorale entre la ligne de rivage et différentes côtes d'altitude à partir du MNT et des relevés terrains.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché à fixer une frontière topographique entre le système montagnard et le littoral, en nous basant sur les travaux réalisés par C. Jost (1997) fondés sur l'hypothèse selon laquelle les premiers contreforts de la chaîne centrale et du massif de péridotites constituent la limite du littoral. Pour vérifier cette hypothèse en utilisant le critère altitude, nous lui avons adjoint (dans le SIG) un descripteur pente obtenu à partir des dérivées premières de l'altitude, calculées à partir du MNT donc sans mesures *in-situ*.

Ensuite, des modélisations paysagères en 3 dimensions ont été effectuées en recouvrant le MNT avec les scènes satellitales afin d'avoir une image plus réaliste du

relief et des massifs montagneux. Ces vues 3D des images satellites ont été créées via un logiciel de traitement d'image (Erdas Imagine®) disposant d'outils de visualisation permettant à l'utilisateur de choisir le positionnement adéquat sur ou au dessus de l'image, avant de se déplacer dans la scène en 3D pour une meilleure observation. Ces modèles 3D (fig. 2) nous ont alors apporté une vision nouvelle de l'espace littoral qui a permis d'affiner la recherche de sa limite côté terre.

Figure 2 - Modèle paysager 3D réalisé par drapage de l'image satellite sur le MNT (exagération X 2, région de Tontouta)



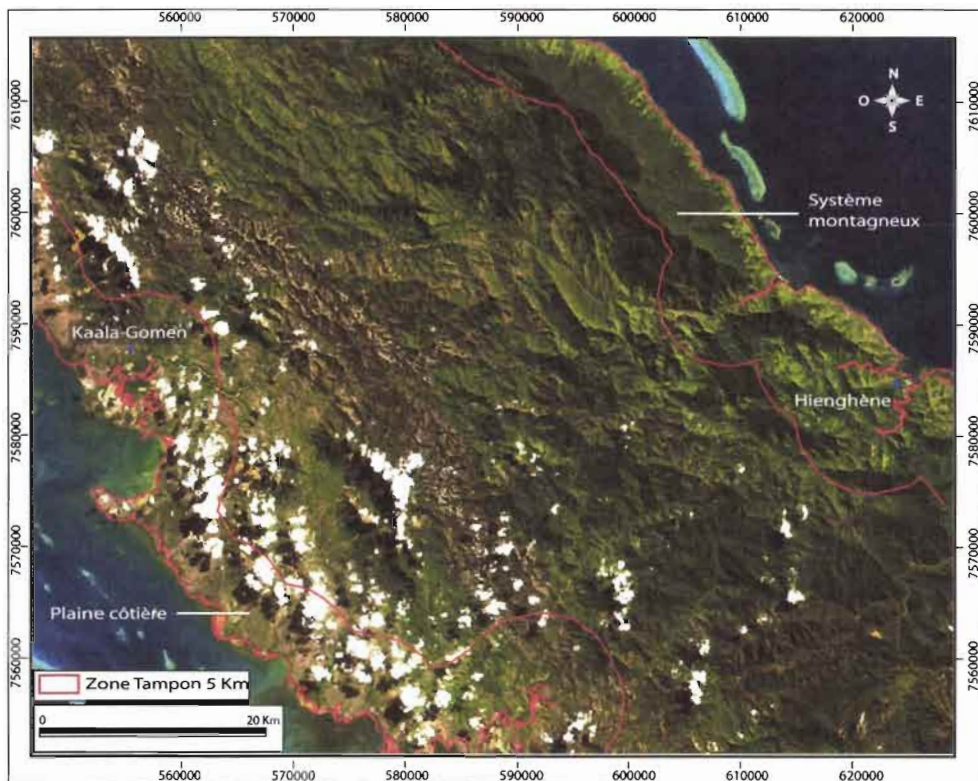
Résultats et discussion

Pertinence du critère distance arbitraire et juridique

La superposition des images satellites Landast 7 calées géométriquement au trait de côte et à la zone tampon de 5 km nous permet rapidement de constater que cette limite englobe une grande partie de la plaine littorale de la côte ouest mais prend aussi en compte le système montagnard de la côte opposée (fig. 3). De par l'hétérogénéité spatiale de la zone littorale, cette limite fondée sur une distance constante par rapport au trait de côte n'a donc pas de sens.

Certes, ce résultat important peut être considéré comme s'appliquant à la plupart des îles hautes, rares étant celles où le contact entre le littoral et l'intérieur des terres est toujours à égale distance de la ligne de rivage. Il s'agit là d'un résultat notable car il oblige désormais les planificateurs ou les gestionnaires de territoires travaillant sur le littoral à fonder les limites qu'ils appliquent à ce dernier sur des critères géographiques d'ordre physique, écologique ou socio-économique. La même remarque s'applique à la limite juridique des « 50 pas géométriques du roi » qui, en raison de sa faible largeur (81,6 m), relève plus de la ligne de rivage que du littoral proprement dit.

Figure 3 - Zone de 5 km du trait de côte superposée à l'image satellite



Pertinence du critère démographique

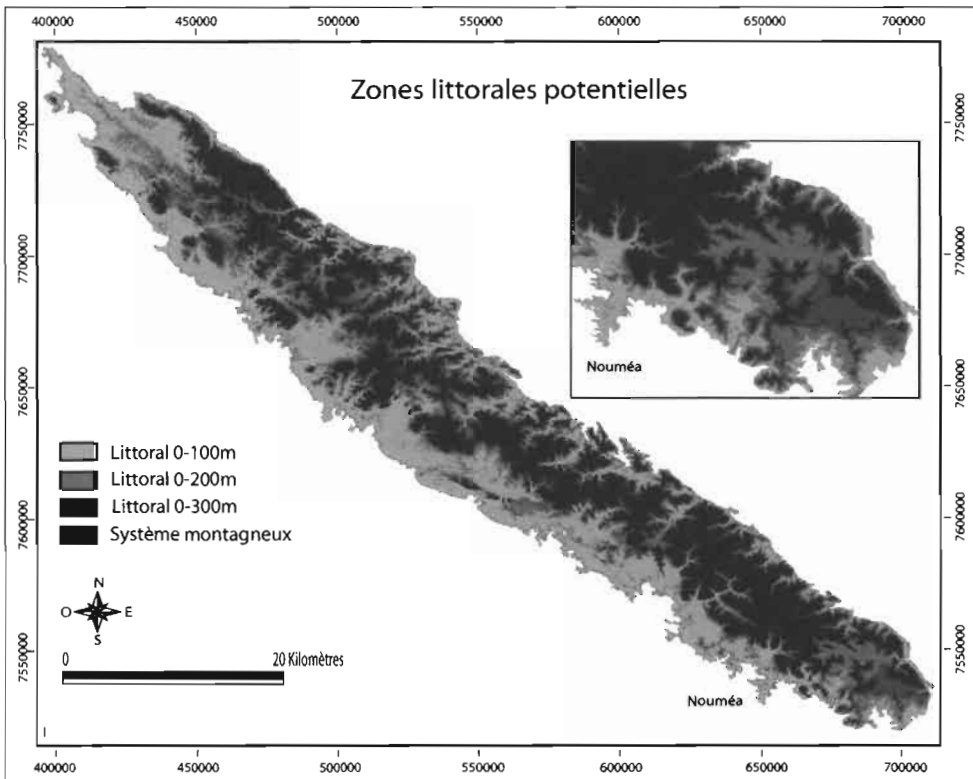
Les calculs des distances des agglomérations et des tribus au trait de côte montrent que la distance moyenne des chefs lieux des communes de la Grande Terre au trait de côte est de 1,4 km. La plus petite distance (17 m), est relevée à Poum, à l'extrême nord de la Grande terre et la plus grande (10 km) à Sarraméa à l'est. Au total, parmi les 33 chefs-lieux de communes, un quart est localisé à moins de 230 m du rivage et la moitié à moins de 650 m. L'essentiel de la population de l'île est concentré sur la côte. C'est notamment le cas de la capitale Nouméa et de la ville du Mont-Dore qui se sont développées directement sur le linéaire côtier et qui regroupent actuellement près de la moitié de la population néo-calédonienne.

La répartition spatiale des tribus est plus diffuse du fait que celles-ci occupent à la fois le système montagnard (situation notamment héritée d'un processus historique) et le système littoral. La distance moyenne au trait de côte est de 5 km. La tribu la plus éloignée du littoral est située à plus de 21 km (tribu de Nérin sur la commune de Houailou au centre de la côte Est) alors que la plus proche en est distante de 8 m (tribu de Titch sur la commune de Poum à l'extrême nord). Au total, un quart des 231 tribus est situé à moins de 270 m du rivage et la moitié à moins de 2,5 km.

Le croisement de ces résultats en relation avec les données démographiques montre que 65 % de la population de la Grande Terre vit à moins de 1 000 m du rivage, 70 % à moins de 2 000 m et 72 % à moins de 3 000 m. Les représentations cartographiques qui découlent de cette répartition (par la création de corridors (*buffer*) dans le SIG ArcView®) prend quelques libertés avec la réalité car il est supposé que dans cette bande la distribution de la population se fait de façon homogène. En revanche, le croisement de ces données avec les densités lissées de population est beaucoup plus satisfaisant. En effet, la carte qui en résulte met en évidence des frontières plus fines du littoral qui correspondent aux lieux de vie des populations.

Pertinence du critère topographique

Figure 4 - Zones littorales potentielles

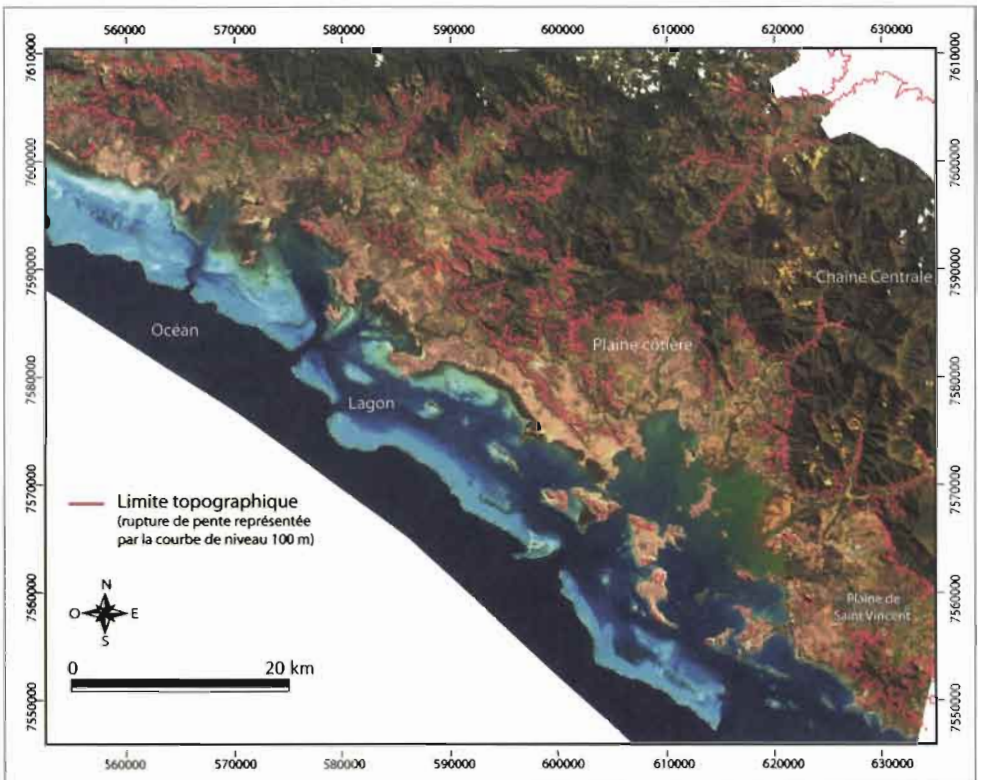


L'analyse de la topographie de la Grande Terre à partir du modèle numérique de terrain (MNT) rend compte des différentes discontinuités physiques liées au terrain. Ainsi, la fonction représentative de l'altitude dans le MNT met particulièrement en évidence une épine dorsale scindant l'île du sud (avec un point culminant à 1 618 m : le mont Humboldt), au nord où le mont Panié culmine à 1 628 m. Cet axe montagneux appelé Chaîne Centrale est marqué par des sommets aux formes arrondies et des versants abrupts encadrant des vallées souvent encaissées. De part et d'autre

de ce massif montagneux, la transition vers le littoral est dissymétrique. À l'Est, les falaises rocheuses dominant brutalement le littoral ; la plaine littorale y est très étroite, voire pratiquement inexistante en de nombreux endroits. À l'Ouest, le relief est moins marqué ; une large bande littorale sépare la chaîne centrale de la ligne de rivage. Une succession de surfaces aplanies différemment étagées de glacis, de collines et de plaines littorales mènent à la mer, produisant de larges baies.

À partir du MNT on peut identifier trois classes d'altitude susceptibles de représenter l'extension spatiale du littoral (0 à 100 m ; 0 à 200 m et 0 à 300 m) (fig. 4). L'analyse de ces trois couches d'information fait apparaître de faibles différences de surfaces entre les trois classes d'altitude, le long de la Chaîne Centrale. La carte des pentes dérivée du modèle numérique de terrain nous apprend qu'à partir de la courbe de 100 m d'altitude, les pentes sont ravinées et abruptes, limitant considérablement la mise en valeur de ces terres et les implantations humaines. Cette rupture topographique constitue ainsi un bon indicateur de la limite terrestre de l'espace littoral.

Figure 5 - Mise en évidence du critère végétation et de l'occupation du sol avec la topographie à partir de l'image satellite



La superposition des couches d'informations « Topographie » et « Population » montre que 99,8 % de la population urbaine (soit plus de 70 % de la population totale en 1996) ainsi que 87 % de la population tribale résident entre les courbes hypsométriques

0 et 100 m. Moins de 3 % de la population totale vit au dessus de 100 m d'altitude. Ces résultats confirment clairement la relation forte entre l'occupation humaine du milieu et les contraintes naturelles d'un relief contrasté. En Nouvelle-Calédonie, comme dans la plupart des systèmes insulaires, les discontinuités polymorphes s'inscrivant dans les paysages influencent largement l'organisation spatiale des territoires.

En définitive, la combinaison des divers paramètres utilisés et les observations de terrain confirment la prédominance de la topographie comme facteur le plus significatif dans l'individualisation du système littoral ; les autres paramètres de différenciation (végétation, occupation du sol, population) lui étant étroitement associés comme on a pu le constater sur les synthèses associées aux images satellites (fig. 5).

Conclusion

Dans un système insulaire d'île haute, nous avons tenté de délimiter la partie terrestre du domaine littoral. Celle-ci a été considérée comme pouvant être décrite par cinq grandeurs spatialisables : la végétation naturelle, la population, les réglementations institutionnelles qui s'y appliquent, l'occupation du sol et la topographie. À chaque grandeur a été associé un ou plusieurs descripteurs dont nous avons cherché à caractériser les seuils marquant les discontinuités de l'espace. Ce travail a fait appel d'une part, à l'analyse analogique des scènes satellites pour identifier par visu-interprétation ces discontinuités dans le paysage insulaire et d'autre part à l'utilisation d'un système d'information géographique pour croiser les descripteurs retenus. Le SIG a permis de tester la pertinence de chaque descripteur vis à vis de l'hétérogénéité et des rugosités de l'espace insulaire en le visualisant sur l'ensemble du territoire étudié et de raisonner ainsi sur des bases solides et reconnues. Il s'est ainsi révélé comme un outil d'aide à la réflexion et au raisonnement spatial sur la structure du territoire néo-calédonien conduisant au choix pertinent des critères de délimitation du littoral, au-delà de ses fonctions habituelles d'outil d'analyse, de traitement et de visualisation des données. À l'issue des diverses combinaisons effectuées sur nos données, la courbe hypsométrique des 100 m a été retenue comme la limite la plus pertinente du littoral. L'analyse analogique des scènes satellites et la démographie ont permis de vérifier que cette rupture de pente induit des discontinuités majeures dans la mise en valeur des terres et l'organisation spatiale de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie comme dans la composition de la végétation naturelle.

Dans cette communication nous avons mis en évidence des critères susceptibles de délimiter l'espace littoral. Cependant, notons que le modèle proposé [$L = f(T, V, P, I, O)$] n'a été expérimenté que sur un seul type de milieu insulaire : l'île haute peu peuplée. Au-delà des diverses classifications du milieu insulaire (Thomas, 1965 ; Doumenge, 1984 ; Given, 1992 ; Clarke et Thaman, 1993), nous pouvons distinguer quatre types élémentaires d'îles, autour de la dichotomie île haute faiblement / densément peuplée et île basse faiblement / densément peuplée. Dès lors, il serait intéressant d'appliquer notre modèle sur ces types élémentaires pour en vérifier la possible généralité. En effet qu'en est-il des îles basses au relief inexistant comme les atolls sur

lesquels la composante topographique n'a plus de sens en tant que critère de délimitation ? Doit-on considérer ces îles comme des espaces tout littoraux, tel que le suggère F. Doumenge à travers son indice côtier (rapport entre la longueur du trait de côte et la surface d'une île) ? Ou bien, doit-on s'appuyer sur l'analyse des autres critères pour pouvoir délimiter leur littoral ? Quel seuil de taille d'île peut-on alors établir pour définir la pertinence de nos critères ?

Références bibliographiques

- ARRÉGHINI L., WANIEZ. P., 1993 - *La Nouvelle-Calédonie au tournant des années 1990 : un état des lieux*. Reclus. Documentation française, Paris.
- BAVOUX J.J., 1997 – *Les littoraux français*, Armand Colin, Paris, 256 p.
- BODIGUEL, M. (eds.), 1997 – *Le littoral entre nature et politique*, L'harmattan, Paris, 234 p.
- BOUSQUET B., 1990 - Définition et identification du littoral contemporain, (in) *Revue juridique de l'Environnement*, n°4, p. 451- 468.
- CABANNE, C., CHAUSSADE, J., CORLAY, J-P., MIOSSEC, A., MIOSSEC, J-M., PINOT, J-P., 1998 – *Géographie humaine des littoraux*, CNED-SEDES, Paris, 471 p.
- CAPECCHI B., 1994 - La Nouvelle-Calédonie au plan physique, (in) *Géo-Pacifique des Espaces français*. Journées de Géographie, 1994, p. 35- 61.
- CATANZARO J. et THÉBAUD O., 1995 - *Le littoral, pour une approche de la régulation des conflits d'usage*, Institut océanographique/lfremer, Paris, 149 p.
- CILLAURREN, E., DAVID, G. et R. GRANDPERRIN , 2002- *Atlas des pêcheries côtières de Vanuatu, un bilan décennal pour le développement* , IRD, Paris, 256 p . + CD ROM
- CLARKE, W. C. et THAMAN R., 1993 – *Agroforestry in Pacific Islands, systems for sustainability*. United Nations University Press, 297 p.
- CORLAY J.P., 1998 – Facteurs et cycles d'occupation des littoraux, (in) *Géographie humaine des littoraux maritimes*, sous la direction d'Alain Miossec, CNED-SEDES, collection Concours., p. 97-161.
- COUTTS, B., 1989 - Mean high water as a cadastral boundary. *Ocean & Shoreline Management*, n° 12, p. 309- 330.
- DAVID G., 1994 - Dynamics of the coastal zone in the high islands of Oceania : management implications and options. In Waddell et P. D. Nunn (eds.) *The margin fades : geographical itineraries in a world of islands*, E. Institute of Pacific studies, The University of the South Pacific, p. 189-213.
- DOUMENGE F., 1984 - Unité et diversité des caractères naturels des îles tropicales, (in) *nature et hommes dans les îles tropicales, réflexions et exemples*, coll. Îles et Archipels, t.3, Cret-Institut de géographie, Université Michel de Montaigne, Bordeaux III, p. 9-24
- DUMORTIER, B. (eds.), 1998a – *Questions de géographie, Les littoraux maritimes : milieux, aménagements, sociétés*, Editions du Temps, Paris, 160 p.
- DUMORTIER, B. (eds.), 1998b – *Questions de géographie, Géographie humaine des littoraux : activités liées à la mer*, Editions du Temps, Paris, 239 p.
- GAMBLIN, A. (eds), 1998 – *Les littoraux espaces de vies*, Sedes, Paris, 368 p.
- GERVAIS-LAMBONY, M.A. (eds.), 1999 – *Les littoraux*, Atlante, Paris, 192 p.

- GIVEN D. R., 1992 – An overview of the terrestrial biodiversity of Pacific Islands. Apia, SPREP, 24 p.
- JOST C., 1997 - Géosystèmes littoraux et lagunaires du sud calédonien : interfaces d'échanges terrestres et marins, (in) *La mer, espace, perception et imaginaire dans le Pacifique Sud*, l'Harmattan, Paris, p. 241-264.
- LAARIBI A., 2000 – SIG et analyse multicritère, ed Hermes, Paris, 192 p.
- LE GUEN T., DAVID G., 1998a - Le développement touristique du littoral occidental de la Grande Terre néo-calédonienne. In *Iles et littoraux tropicaux*, 10 p.
- LE GUEN T., DAVID G., 1998b - L'aquaculture de la crevette *Penaeides* en Nouvelle-Calédonie (1970-1995). *Les cahiers d'Outre-Mer*, vol 51, N° 203, p. 305- 322.
- MARTEN, K.D., 1985 - Tropical forestry in Melanesia and some Pacific Islands. Environnement and ressources in the Pacific. *Unep Regional Seas reports and studies* n° 69, p. 11-128.
- MARTONNE E. DE, 1909 – *Traité de géographie physique*, 3 volumes, I Notions générales, climat, hydrographie, II Le relief du sol, III Biogéographie, 1518 p.
- MIOSSEC, A., 1998 – Les littoraux entre nature et aménagement. Sedes, Paris, 192 p.
- THOMAS W (L.), 1965 – The variety of physical environments among Pacific islands. In Forsberg, F. (R.), *Man's place in the island ecosystems : a symposium*, Bishop Museum Press, Honolulu, p. 7- 37.

The use of GIS for a quantitative description of essential fish habitats in the Bay of Biscay (France)

Olivier LE PAPE, IFREMER-DRV-RH-ECOHAL, Nantes, France
Florence CHAUVET, Universoté d'Orléans, France
Jean-Marie FOTSING, Université d'Orléans - IRD Orléans, France
E-mail : olepape@ifremer.fr

Abstract: Coastal zone systems are highly productive areas that serve as nursery grounds for many marine species of commercial importance. However, habitat destruction is the most harmful means of slowing or preventing fish stock recoveries. In this context, the purpose of the present study is to identify and describe the coastal nursery grounds for the common sole, one of the most important species for the fisheries, in the Bay of Biscay. The relation between the physical properties of the coastal zone (bathymetry, sedimentology, river plume) and juvenile sole density was described with mathematical models for young-of-the-year sole. Hence, these model results were introduced in a Geographic Information System (GIS) to identify and describe quantitatively key sites for the early life stages of sole. The respective influence of the different habitats is studied and the important role played by coastal areas under freshwater influence is pointed out. This GIS will be an important tool for coastal management.

Key words: Coastal management, GIS, mathematical models, essential fish habitats

Utilisation des SIG pour la description quantitative des habitats préférentiels dans la baie de Biscay en France

Résumé : De nombreuses espèces de poissons passent leurs premières années sur des nourriceries côtières et estuariennes. Ces écosystèmes sont essentiels pour la croissance des juvéniles et leur dégradation peut affecter la taille des populations. Dans ce contexte, ce projet s'intéresse à l'identification des nourriceries de sole du golfe de Gascogne. La relation entre la répartition spatiale des juvéniles de sole et des descripteurs physiques du milieu (bathymétrie, couverture sédimentaire, panaches fluviaux) a pu être modélisée. Disposant d'une connaissance exhaustive de ces paramètres physiques, il est possible d'introduire les résultats de modèle dans un SIG afin d'obtenir une cartographie quantitative de ces habitats. Ce travail a démontré que ces nourriceries sont localisées dans une frange très côtière du plateau continental, dans des zones influencées par les apports d'eau douce ; il sera un élément important d'aide à la décision pour les responsables de l'aménagement du littoral.

Mots clés : Aménagement côtier, SIG, modèles mathématiques, habitats marins essentiels

Introduction

Coastal zone systems are highly productive areas that serve as nursery grounds for many marine species of commercial importance (Costanza *et al.*, 1997). However, habitat destruction is the most harmful means of slowing or preventing stock recoveries (Hall, 1998). Constant demands on the coastal zone from a wide range of human activities suggest that the continued function of natural communities may be threatened in some areas. Thus, the identification of these essential fish habitats is important for coastal management.

The inshore waters of the Bay of Biscay (ICES Division VIIIa/b; Fig. 1) support nursery areas for several commercially important species, especially the common sole (*Solea solea*, L.). The purpose of the present study was to identify and describe in quantitative terms the coastal nursery grounds for these species, using physical parameters known to influence the spatial distribution of juvenile sole (Gibson, 1997): bathymetry, sediment structure and estuarine influence.

This analysis was based on a number of surveys of juvenile flatfish species undertaken throughout the Bay of Biscay during a 15-year period. The relation between the physical properties of the coastal zone and juvenile sole density was studied for young-of-the-year (y-o-y) sole. Generalized linear models and a Geographic Information System (GIS) were used to identify and describe key sites for the early life stages of sole. The respective influence of the different habitats was studied as well as the relation between interannual variations of nursery ground capacity (with respect to estuarine extend) and sole recruitment. The aim of this paper is to show how GIS has contributed as a main tool of scientific investigation in the field of this research.

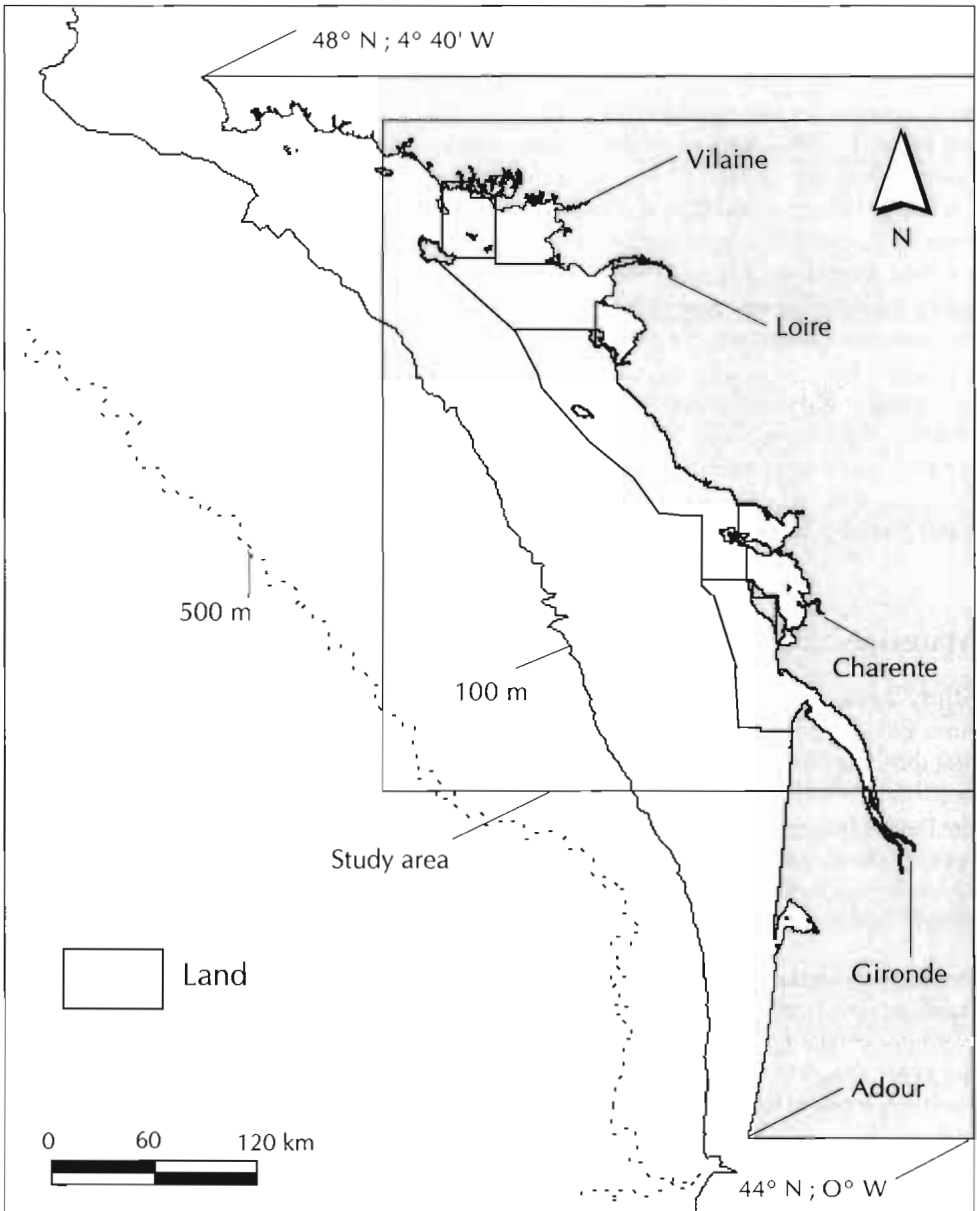
Materials and Methods

Study area. Figure 1 shows the Bay of Biscay on the western coast of France (ICES Area VIIIa/b; fig. 1). In this region, the study area is an arm of the North Atlantic indenting the coast line. The continental shelf, which extends 160 km from the coast in the north and narrows to 65 km in the south toward the Spanish coast, underlies most of the Bay of Biscay. Sole is the most frequent, abundant and regularly exploited demersal species (Koutsikopoulos & *al.*, 1995). In the Bay of Biscay, sole born in well identified spawning grounds 80 to 100 km from the coast then migrate to offshore nurseries where they mature to adult age (Koutsikopoulos & *al.*, 1991).

Beam trawl survey data. From 1985 to 1997, a number of independent coastal beam trawl surveys (representing 855 trawl hauls) for juvenile flatfish species, especially sole, were undertaken (IFREMER, R.V. Gwen Drez) in autumn throughout an area located in the central part of the Bay of Biscay (Fig. 1). This season was chosen because it is the most appropriate for the study of nursery grounds (Dorel *et al.*, 1991). As demonstrated in Koutsikopoulos & *al.* (1989), only larvae completing metamorphosis within coastal nursery grounds are likely to develop. Hence, these coastal surveys are appropriate for studies of habitat suitability for juvenile sole. Operating conditions were checked and

standardized from the first survey. All sole were counted, measured and age groups were determined from size groups. Young-of-the-year densities were calculated for each trawl haul (number of 0 group sole caught per hectare).

Figure 1 - The Bay of Biscay, showing the main rivers, the 100 and 500 m isobaths, the limits of the study area and the divisions between the coastal sectors used in the analysis



Physical descriptors and nursery grounds. Informations on the physical parameters known to influence habitat suitability for juvenile sole were taken from the following sources :

- A bathymetry map from *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, France*, at the scale of 1/500,000 indicating the coastline and isobaths of 5, 10, 20 and 50 m.
- A sediment structure map from *Bureau de Recherches Géologiques et Minières, France* at a scale of 1/500,000 showing five classes of sediment (mud, fine sand, rough sand, gravel and rock).

A three-dimensional hydrodynamic model of the Bay of Biscay with 5 km grid sides (Lazure and Jégou, 1998), which simulates hydrologic conditions relative to climatic factors and five main rivers flows (Fig. 1) and allows quantification of river plume extent. As described in Le Pape & al. (2003) for Vilaine Bay, the extent of the river plume before or at the beginning of the benthic life of y-o-y sole influences the size and biotic capacity of habitats in estuarine nursery grounds and determines the number of juveniles produced. In the Bay of Biscay, newly metamorphosed individuals settle into coastal and estuarine nursery grounds from April to June (Koutsikopoulos & al., 1989). Hence, the surface salinity given by the model for the beginning of April (Julian day 92) was used to describe the influence of the river plume. As it was necessary to dissociate estuarine areas from marine waters, two classes were determined for surface salinity data: < 31 PSS for estuarine waters and ≥ 31 PSS for marine waters. Thus, for each study year (from 1985 to 1997), the surface salinity map represents both classes at Julian day 92.

However, the different coastal areas of the Bay of Biscay do not receive the same quantity of sole larvae (Koutsikopoulos et al., 1991). Rijnsdorp & al. (1992) showed that the sole recruitment pattern in the North Sea is only similar for coastal nursery areas with a similar coastline direction. Thus, it is important to take the different coastal sectors into account in modeling the distribution of juvenile sole in coastal nurseries. For this purpose, the study area was divided into 9 sectors according to coastal morphology (see Fig. 1).

Habitat suitability models for juvenile sole

Developing quantitative maps of juvenile sole distribution based on physical and geographic descriptors required three successive operations:

Coupling data with a GIS

- Physical descriptors and coastal sectors were included in a GIS, which allowed different layers of data to be intersected to obtain a stratification of the study area year by year on the basis of four parameters (bathymetry \times sediment structure \times salinity in two classes at Julian day 92 \times coastal sectors). Information on physical and geographic factors was then combined with survey data. The latter, identified from the mean position of the trawl haul and the year of the survey, were included in the GIS in order to associate, for each trawl haul, bathymetry, sediment structure, surface salinity class at Julian day 92 and geographic sector.

Developing a model

A generalized linear model (GLM) based on survey data was then developed to describe the distribution of juvenile sole with regard to these factors. The model was built assuming a delta distribution for juvenile sole distribution. A binomial distribution for the presence of juvenile sole was coupled with a log-normal distribution for density when juvenile sole were present. The maximum likelihood estimation for this model amounted to fitting one GLM to 0/1 values and another to positive abundance values then to couple these two submodels (Stefansson, 1996).

1 - Developing a binomial model for the presence of y-o-y sole

$$YS_{0/1} \approx \text{factor (Salinity)} + \text{factor (Sediment)} + \text{factor (Bathymetry)} + \text{factor (Sector)} + \varepsilon_{0/1}$$

Where:

* $YS_{0/1}$ is the Boolean value for y-o-y sole density (0 if no y-o-y sole were caught, 1 otherwise), i.e. the response variable of the GLM fitted to a binomial distribution and a logit link;

* factor («physical factor») constitutes the four qualitative variables used as explanatory variables in the model;

* $\varepsilon_{0/1}$ constitutes the residuals assumed to be binomially distributed.

2 - Developing a model for positive y-o-y sole density values

$$\ln(YS_+) \cong \text{factor (Salinity)} + \text{factor (Sediment)} + \text{factor (Bathymetry)} + \text{factor (Sector)} + \varepsilon_+$$

Where:

* YS_+ is the value for y-o-y sole density (number of fish per hectare) when juveniles are present. The logarithm of YS_+ is the response variable of this GLM fitted to a Gaussian distribution and an identity link. Preliminary tests showed that these options were the best ones to describe log-normal distribution of positive values.

* ε_+ constitutes the residuals assumed to be normally distributed.

This basic formulation, with no crossover effects between the different factors, was used because of certain spatial singularities in the sampling scheme. As all of the possible combinations among physical and geographical factors did not exist in survey data, these singularities would have led to numeric bias.

3 - Linking these models to estimate habitat suitability for y-o-y sole

$$\hat{YS} = \hat{YS}_{0/1} \times e^{\hat{ln}(YS_+)} \times e^{-\frac{\hat{\sigma}^2(\hat{ln}(YS_+))}{2}}$$

Where:

* \hat{YS} is y-o-y sole density estimated with a delta model combining the two previous models;

* $\hat{YS}_{0/1}$ is the probability of the presence of y-o-y sole, as estimated with the binomial model;

- * $\hat{\ln}(YS+)$ is the logarithm for the density of y-o-y sole when present, as estimated with the log-normal model;
- * $\hat{\sigma}(\hat{\ln}(YS+))$ is the standard error of the logarithm for the density of y-o-y sole when present, as estimated with the log-normal model.

This estimation takes account of the correction calculated by Laurent (1963) to obtain an unbiased estimate from a linear model based on log-transformation.

Including model results in the GIS

As the GIS takes into account an exhaustive description of the four model descriptors (bathymetry \times sediment structure \times salinity in two classes at Julian day 92 \times coastal sectors), the model results (one fitted density for each combination of the descriptors) were included in the GIS to map the fitted densities of 0-group sole.

Moreover, results for the habitat suitability model and the GIS were also coupled to calculate an index of juvenile abundance based on the extent of geographic stratum areas:

- The surface area of each stratum (Bathymetric class \times Sediment structure \times River Plume class \times Coastal Sector) was calculated using the GIS for the different hydrologic situations (one hydrologic situation per year between 1985 and 1997, i.e. one map per year of the surface salinity given by the model at Julian day 92).
- For each stratum, a number of 0 group sole was calculated as the product of this surface area multiplied by the corresponding density value, as determined with the model described in the previous section.
- It was then possible to use the number of fish calculated to determine the contribution of the different habitats to total stock as a percentage of the total number of fish in the overall area for the different hydrologic situations.

Results

Habitat suitability model

Y-o-y sole densities were characterized by a large number of zero values. In spite of targeted surveys on coastal areas where juveniles are located, y-o-y sole were caught in only 60% of trawl hauls. Thus, the delta model of habitat suitability, with zero values treated separately and positive values assumed to follow a log-normal distribution is quite suitable for description of these data (tab. 1). The effects of the four descriptors were significant for both the binomial and the positive models, and there was no trend in the residuals of the positive model.

Two geographic areas appear to shelter high densities of juvenile sole, one in the south, in the semi-enclosed bays located north of the Charente estuary, and the other off the Loire estuary (fig. 2).

Figure 2 - Fitted y-o-y sole abundance for mean hydrologic conditions in the study area

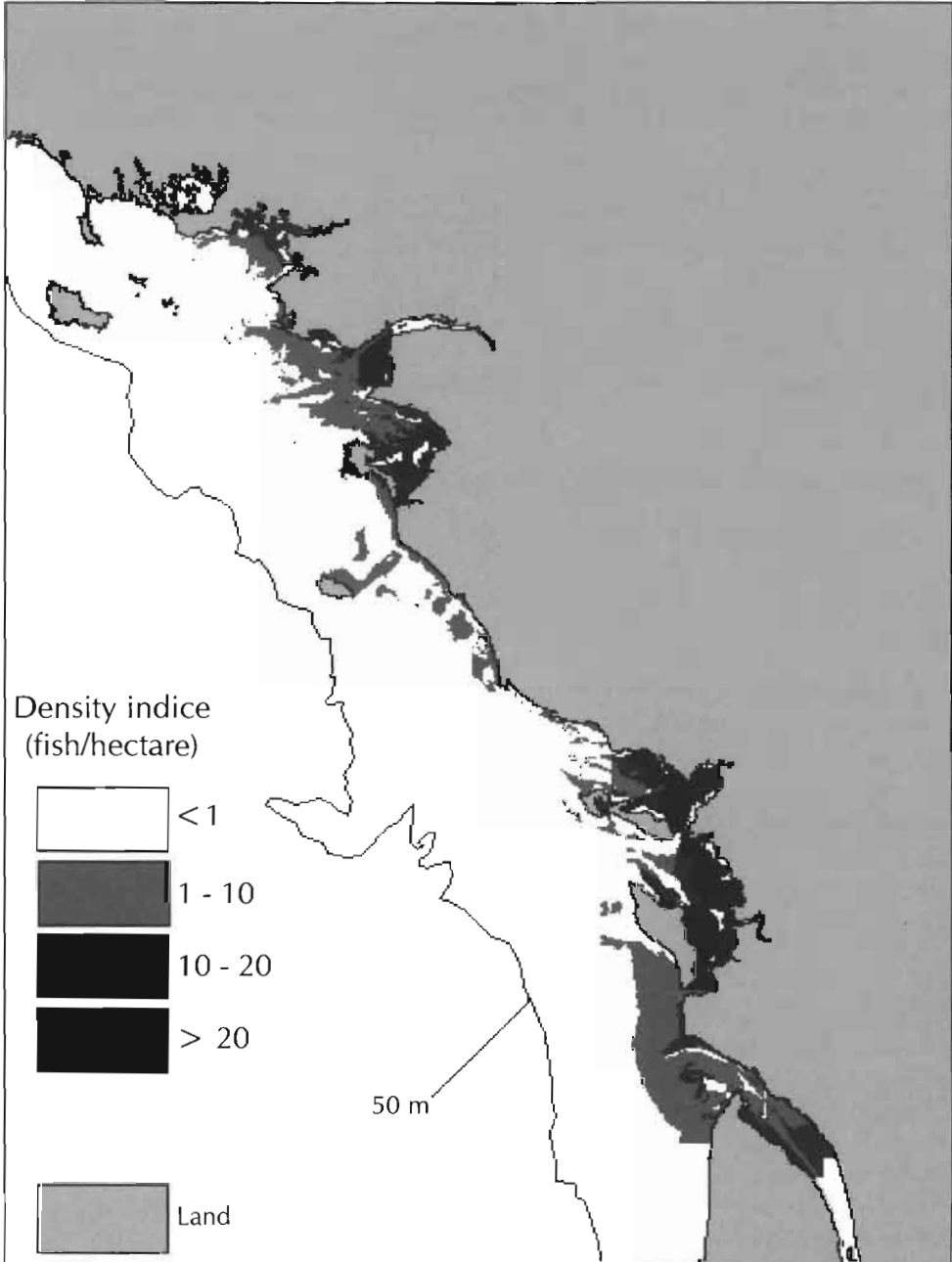


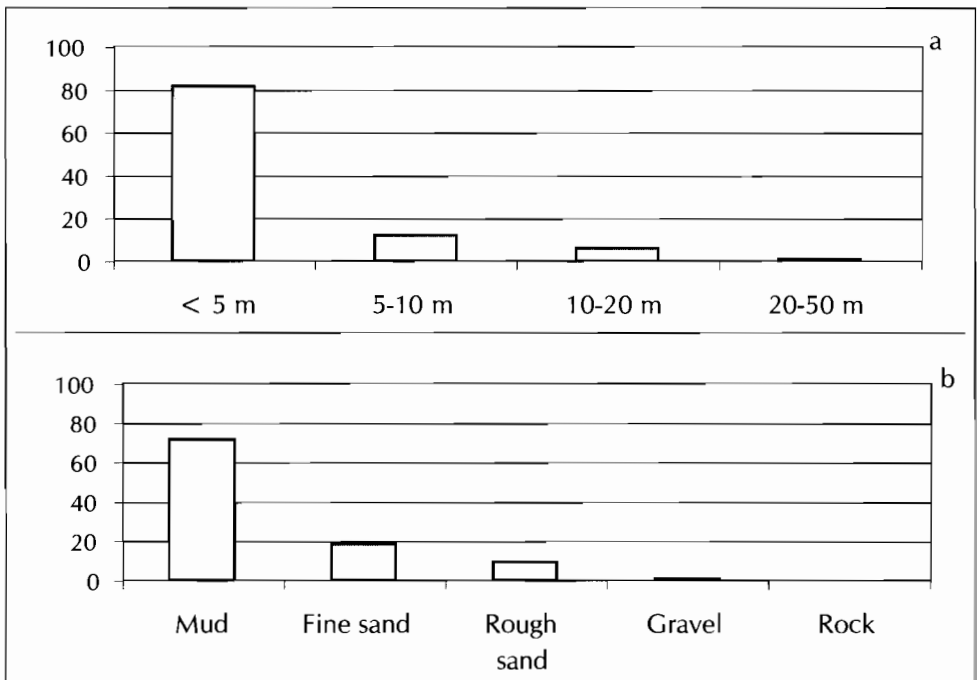
Table 1 - Analysis of deviances for the two parts of the delta log-normal Generalized Linear Model

	Binomial model			Positive value model		
	DoF	Deviance	Pr(Chi)	Dof	Deviance	Pr(Chi)
Null	853	1153		507	2043	
Estuarine plume	852	1128	4.89E-07	506	2015	1.15E-07
Sediment	849	1082	7.82E-10	503	1991	3.13E-05
Bathymetry	846	1021	3.00E-13	500	1878	0
Geographic sector	838	885	0	493	1450	0
Explained deviance (%)		23			29	

Columns indicate residual degrees of freedom (DoF), residual deviance and p-values when a χ^2 -test was used for significance.

Thus, despite consequent residual deviance due at least in part to considerable small-scale variability, the factors of river plume extent, sediment structure and bathymetry contributed significantly to determine y-o-y sole distribution. Moreover, as juvenile sole distribution depended on the separate geographic sectors distinguished in the Bay of Biscay study area, it is not realistic to describe distribution without taking this geographic heterogeneity into account.

Figure 3 - Contribution (% of total juveniles in the study area) of the different habitats according to bathymetry (a) and sediment structure (b)

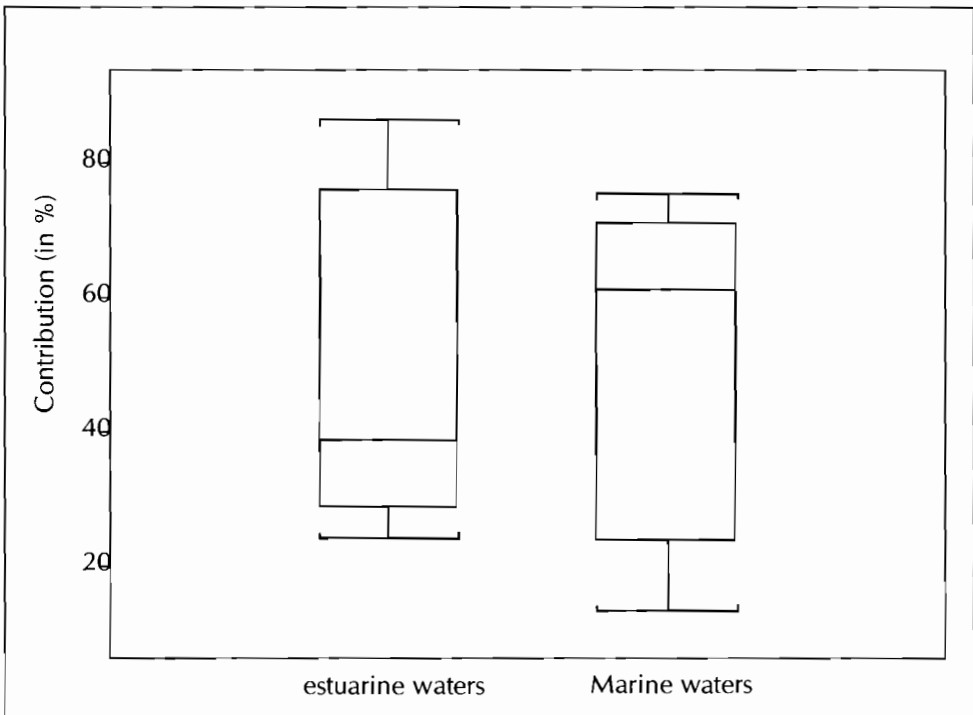


Location of nursery grounds and contribution to population size

Juveniles were concentrated in a few limited coastal sectors (fig. 2) close to the shore near the main river mouths (fig. 1) and in protected bays. Habitat variability was related to hydroclimatic conditions and did not significantly affect the contribution of the different bathymetric or sediment classes to sole stock.

Figure 3a shows the quite important role of very shallow areas (< 5 m depth) in providing nursery grounds for sole. These areas represented only 24% of the overall study area within the 50 m depth limit, but contributed 81% of the total number of juveniles during the productive period. The contribution to stock decreased as depth increased, and areas deeper than 20 meters were unsuitable for nursery grounds. Muddy areas represented only 29% of the study area, but contributed 71% of the total number of juveniles (Fig. 3b). The contribution to stock decreased with increasing granule size. Very shallow muddy areas (< 5 m) represented only 10% of the study area, but contributed 60% of the total number of juvenile sole.

Figure 4 - Contribution (% of total juveniles in the study area) of estuarine and non-estuarine waters (bar: upper and lower quartiles; whiskers: extreme values; bold line: median value)



The contribution of estuarine waters, defined as areas where surface salinity was lower than 31 PSS on Julian day 92, was very variable from one year to another (Fig.

4), accounting for less than 25% of total juveniles in dry years and more than 85% in years when the river plume was extensive at the beginning of the settling period. Nevertheless, the contribution of these plume sectors was considerable (a mean 48% of the total number of juveniles for 24% of total surface area).

Discussion – Conclusion

Habitat suitability for juvenile sole

As the study area covered a large part of the Bay of Biscay, our analysis provides a typology of nursery habitats on a Bay of Biscay sole stock scale. Previous studies showed that recruitment level is related to nursery ground area (Rijnsdorp *et al.*, 1992; Le Pape *et al.*, 2003) and juvenile densities, depending on habitat quality (Gibson, 1997). In this respect, the present study can be used to assess the relative contribution of the different nursery habitats to Bay of Biscay sole stock.

Juvenile sole appear to be concentrated in limited shallow and muddy habitats. This descriptive typology is well known, and the preference of juvenile sole for shallow areas covered with fine sediment has been demonstrated (Gibson, 1997). Our quantitative approach concerning the respective contributions of different habitats clearly indicates that juvenile sole are concentrated in limited and essential habitats, i.e. very shallow muddy areas representing 10% of the total study area contribute 60% of the total number of juveniles.

This study also confirmed expectations about the important role played by estuarine areas (Koutsikopoulos *et al.*, 1989; Le Pape *et al.*, 2003). Our study, by focusing on the interannual variability of the estuarine influence relative to hydrologic conditions and interannual variations of habitat capacity, develops the concept of fluctuating habitat size, which adds a dynamic variable to condition the fixed relationship between nursery area and recruitment (Rijndorp *et al.*, 1992).

GIS as a tool for identifying the essential fish habitat

Multivariate models are commonly used to define habitat suitability (Norcross *et al.*, 1999) and can be combined with geographic information systems to create potential distribution maps (Guisan and Zimmermann, 2000; Eastwood *et al.*, 2001; Riou *et al.*, 2001; Stoner *et al.*, 2001).

The delta distribution method tends to limit the problems encountered in other models with zero values, which are generally frequent in fish survey data (Stefansson, 1996). Moreover, as stock abundance is represented by two sources of information with different meanings, i.e. the level of non-zero catch rates and the probability of catching the species, it is important to use a comprehensive abundance index that integrates both kinds of information (Ye *et al.*, 2001).

A method of this type, based on descriptors known throughout the study area, provides a relative index for mean juvenile distribution based on the extent of the respective geographic areas and thus an assessment of the contribution of different habitats to the common stock. In this way, the essential fish habitat can be determined, which is in fact a limited area contributing largely to fish stock renewal. The identification of essential fish habitats can prevent anthropogenic disturbance, especially when these areas are spatially limited. The method developed in this study, based on model on GIS coupling, can be applied to other species in order to provide a general description of essential fish habitats for the marine community (Rubec *et al.*, 2001).

This study well illustrates the interest of GIS to study marine resources habitats and to develop tools for coastal management. Actually, GIS is the single tool allowing to transfer results of model based on localized *in situ* data to exhaustive quantitative maps (Eastwood *et al.*, 2001; Stoner *et al.*, 2001) and to quantify the respective influence of different habitats (Riou *et al.*, 2001 and the present study). These methods of model + GIS coupling are of course not specific to coastal marine management and can be used for other topics in ecology (Guisan and Zimmermann, 2000).

Acknowledgments

This project was supported by the French National Programme for Coastal Ecology. The authors are grateful to Pierre Beillois (IFREMER) for assistance in running "Arcview GIS" software.

References

- COSTANZA R., DARGER R., DEGROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., ONEILL R.V., PARUELO J., RASKIN, R.G., SUTTON P., VANDENBELT M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 253-260.
- DOREL D., KOUTSIKOPOULOS C., DÉSAUNAY Y., MARCHAND J., 1991. Seasonal distribution of young sole (*Solea solea* L.) in the nursery ground of the bay of Vilaine (Northern Bay of Biscay). *Neth. J. Sea Res.* 27: 297-306.
- EASTWOOD P. D., MEADEN G. J., GRIOCHE A., 2001. Modelling spatial variations in spawning habitat suitability for the sole *Solea solea* using regression quantiles and GIS procedures. *Marine Ecology Progress Series* 224, 251-266.
- GIBSON R.N., 1997. Behaviour and distribution of flatfishes. *Neth J. Sea Res.*, 37 241-256.
- GUISAN A., ZIMMERMANN N.E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.*, 135, 147-186.
- HALL S.J., 1998. The effects of fishing on marine ecosystems and community. Blackwell Science, Oxford.
- KOUTSIKOPOULOS C., DÉSAUNAY Y., DOREL D., MARCHAND J., 1989. The role of coastal areas in the life history of sole (*Solea solea* L.) in the Bay of Biscay, In: Ros J. (ed.), Topics in Marine Biology, Proceedings of the 22nd European Marine Biology Symposium, *Scienc. Mar.*, 53 (2-3): 567-575.
- KOUTSIKOPOULOS C., FORTIER L., GAGNÉ J. A., 1991. Cross-well dispersion of Dover sole

- (*Solea solea* (L.)) eggs and larvae in Biscay Bay and recruitment to inshore nurseries. *Journal of Plankton Research* 13, 923-945.
- LAURENT A. G., 1963. The log-normal distribution and the translation method: description and estimation problems. *Journal of American Statistical Association* 58, 231-235.
- LAZURE, P., JÉGOU, A. M., 1998. 3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf. *Oceanologica Acta* 21, 165-177.
- LE PAPE O., CHAUVET F., DÉSAUNAY Y., GUÉRAULT G. (2003) Relationship between interannual variations of the river plume and the extent of nursery grounds for the common sole (*Solea solea*, L.) in Vilaine Bay. Effects on recruitment variability. *Journal of Sea Research* 50 (2/3), 177-185.
- NORCROSS B. L., BLANCHARD A., HOLLADAY, B. A., 1999. Comparison of models for defining nearshore flatfish nursery areas in Alaskan waters. *Fisheries Oceanography* 8, 50-67.
- RIJNSDORP A.D., VAN BEEK F.A., FLATMAN S., MILLNER R.M., RILEY J.D., GIRET M., DE CLERCK R., 1992. Recruitment of sole, *Solea solea* (L.), stocks in the Northeast Atlantic, Netherlands J. Sea Res. 29(1-3): 173-192.
- RIOU P., LE PAPE O., ROGERS S., 2001. Relative contributions of different sole and plaice nurseries to the adult population in the Eastern English Channel. Application of a combined method using Generalized Linear Models and Geographic Information System. *Aquatic Living Resources*: 14: 125-135.
- RUBEC P. J., BEXLEY J. C. W., NORRIS H., COYNE M. S., MONACO M. E., SMITH S. G., AULT, J. S., 1999. Suitability modeling to delineate habitat essential to sustainable fisheries. *American Fisheries Society Symposium* 22, 108-133.
- STEFANSON G. 1996. Analysis of groundfish survey abundance data: combining the GLM and delta approaches. *ICES Journal of Marine Science* 53, 577-588.
- STONER A. W., MANDERSON J. P., PESSUTI, J. P., 2001. Spatially explicit analysis of estuarine habitat for juvenile winter flounder: combining generalized additive models and geographic information systems. *Marine Ecology Progress Series* 213, 253-271.
- YE Y., AL-HUSSAINI M., AL-BAZ A., 2001. Use of generalized linear models to analyze catch rates having zero values: the Kuwait driftnet fishery. *Fisheries Research* 53, 151-168.

GIS-based tools in a decision support system for the integrated management of water resources at the catchment's scale

Isabelle LA JEUNESSE, Mark ROUNSEVELL, Marnik VANCLOOSTER, Agnieszka ROMANOWICZ,
Université catholique de Louvain, Belgium
E-mail : lajeunesse@tiscali.fr

Abstract: The MULINO project (Multi-sectoral, Integrated and Operational decision support system (DSS) for the sustainable use of water resources at catchment scale), funded by the Environment and Climate Programme of the European Union, aims to support the scientific basis for integrated water resources management required by the Water Framework Directive. The purpose of the project is to provide an operational tool to water resource managers. This paper presents the methodological aspects of the project and shows how GIS-based techniques contribute to facilitate relations between the DSS software and the models used. GIS-based techniques support : (i) the execution of physical models to produce inputs for the DSS, (ii) the creation of suitable databases and maps for exchange of information between scientists, end-users and stakeholders.

Key words: GIS-based models, Decision Support System, integrated water resource management.

Modélisation assistée par SIG dans un Système d'Aide à la Décision pour la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle du bassin versant

Résumé : Le projet MULINO (Multi-sectoral, Integrated and Operational decision support system (DSS) for the sustainable use of water resources at the catchment scale), financé par le programme Environnement et climat de l'Union Européenne, a pour objectifs de promouvoir les bases scientifiques d'une gestion intégrée des ressources en eau telle que formulée par la Directive cadre de l'eau. Le logiciel conçu est basé sur de la modélisation hydrologique, des indicateurs multidisciplinaires, des analyses multicritères et ce en interface avec des outils d'analyses spatiales et de gestion des bases de données ; le but étant de fournir un outil opérationnel aux gestionnaires des ressources en eau. Cet article présente les aspects méthodologiques du projet et montre comment les techniques développées dans des SIG interviennent pour faciliter les relations entre le logiciel de SAD et le modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assesment Tool). Ces techniques SIG permettent (i) l'exécution des modèles physiques dédiés pour produire des données d'entrée pour le SAD, (ii) la création des bases de données et cartes appropriées pour les échanges d'information entre scientifiques et utilisateurs finaux du SAD, à savoir des gestionnaires.

Mots clés : Modèles développés dans des SIG, Systèmes d'aide à la décision (SAD), gestion intégrée des ressources en eau.

Introduction

The pressure on water resources is continuously increasing in Europe and managing water resources in a sustainable way is a challenging task. In recent years, many research efforts have focused on the solution of specific problems for the management of water resources. A great deal of scientific knowledge is now available in many sectors, but this knowledge is often treated in isolation.

The *MULINO* project (Multi-sectoral, Integrated and Operational decision support system for the sustainable use of water resources at the catchment scale) which is funded by the Environment and Climate Programme of the European Union (EU), is being undertaken to support the scientific basis for integrated water management. The purpose of the project is to provide a tool to improve the integrated management of water resources at the catchment scale, following the requirements of the EU Water Framework Directive (WFD). The main objectives of the *MULINO* project are to (1) make a multidisciplinary diagnosis of the main issues for local water management, (2) conceptualise an operational Decision Support System (DSS) for integrated water management, (3) define a set of water management alternatives, and (4) test a set of future scenarios of environmental change.

Using the concept of integrated management defined first clearly for coastal zones by Cicin-Sain and Knecht (1998), the envisaged levels of integration for the integrated management of water resources in the WFD are five : (i) intersectoral integration : the integration is an horizontal integration among different sectors or human activities concerned by the water resources, (ii) intergovernmental integration : an harmonized policy development and implementation between natural and sub-natural levels should be expected, (iii) spatial integration : the integration has to take into account the resource in the integrality of its spatial limits. In the context of the WFD the basic spatial unit is the hydrological catchment reaching seas and oceans (river basin district), (iv) science-management integration : interdisciplinary diagnosis is required and (v) international integration : national boundaries may no longer be a barrier to integrated water resource management. All the countries within a given catchment have to contribute to the formulation of the water resource management plan. This is particularly the case for large catchments such as the Scheldt, the Rhine and so on.

Geographical Information Systems (GIS) allow to integrate easily spatially distributed environmental data and are therefore powerful tools for supporting spatial decision making (Densham, 1991), in particular in environmental management contexts (Gayte et al., 1997). Hence, they are also appropriate tools for tackling integrated water resource management issues.

In the *MULINO* project, GIS are the basis of exchanges of information between the human and the physical sciences part of the DSS tool developed by supporting (i) the execution of physically-based models to produce inputs for the DSS, (ii) the creation of suitable databases and maps for exchanges between scientists, end-users and stakeholders.

In this paper, we present first, the *MULINO*-DSS software conceptualization. Second, by means of a case study of water management in Belgium, we show how GIS databases are constructed and integrated in the DSS, in particular in relation to the hydrological modelling component of the DSS.

Methodology for the development of the MULINO-DSS software

DSS are computer tools that are used to support problem solving and decision making (Shim et al., 2002). The MULINO-DSS aims at organizing and communicating indicators that could be used to assist sustainable decisions by integrating environmental, economic and social information. The DSS is a software package based on hydrological modelling, multi-disciplinary indicators and multicriteria evaluation procedures. Two scales are studied: the catchment scale and the European scale as the DSS will be implemented in six catchments of five European countries : Belgium, Italy (2 case studies), Portugal, Romania and the United-Kingdom. GIS-based spatially distributed hydrological models, run with interfaces within the DSS tool, support testing of the impact on water resources of different management alternatives. Capabilities for geographical data handling and display are embedded within the DSS to support the management of spatial data and the interface with the end-user.

DPSIR

The European Environment Agency uses a chain of linkages defining cause and effect relationships between the Driving Forces within society (D), the pressures on the environment caused by human activities (P), the state of the environment (S), the impact on the environment and on human activities (I) and desirable societal responses (R) to these impacts (OECD, 1993 ; EEA, 1999). The links within the DPSIR chain are described by indicators which have two main functions (1) reducing the number of parameters and (2) simplifying the communication process by which information and results are provided to the user. An indicator is a parameter or value derived from a parameter which provides information about a relationship between the DPSIR chain elements. As indicators are used for varying purposes, it is necessary to define general criteria for indicators at each stage of the DSPIR chain. The criteria for indicator selection are (1) user and policy relevance, (2) analytical soundness and (3) measurability (OECD, 1993). This framework provides the decision maker with an integrated view of environmental issues.

As modelling seems to be the only way to integrate the available scientific knowledge and data seems to deliver adequate information for the policy preparation process (Luiten, 1999), the MULINO-DSS links the DPSIR framework to models such as hydrological system models (fig.1). Those models, linked to spatial information, are GIS-based. In the MULINO-DSS, the management alternatives represent the possible responses (R) proposed to solve the impacts (I). These are termed « options » and represent the feasible actions or activities to solve a decision problem.

To clarify the structure of the MULINO-DSS within the DSPIR cause-effect relationships, consider an example of a DPSIR chain constructed for the flooding issue in the Dyle catchment in Belgium. The driving force (D) is the climate. The pressure is the rainfall. The state (S) is the height of surface waters levels' which leads to flooding when a defined threshold is surpassed. The impact (I) - considered only if it is negative for the environment and/or human activities – is a function of where and when the flooding

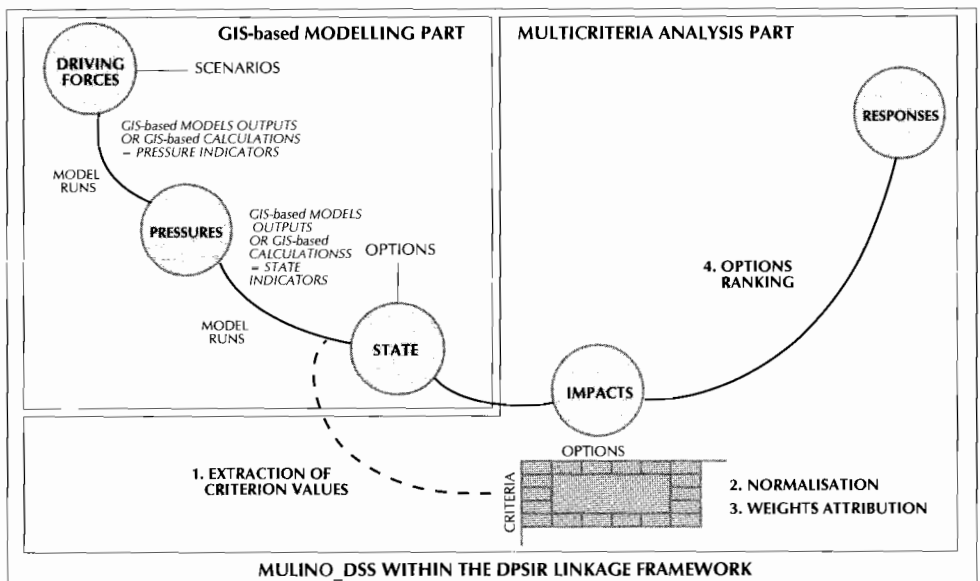
takes place (e.g., the impact of flooding is more important in cities than in wetlands and varies in agricultural areas during the year as a function of the crop growing). To reduce the impact of flooding, the management options (R) could be, for example, to (i) build a storm basin, (ii) restore river banks, (iii) dredge the river or (iv) rehabilitate wetlands. The hydrological models linked to the DSS provide values for criteria selected by the end-user (e.g. flow in the river, volume stored in the storm basin and so on...) for these four options.

It is also possible to test some scenarios by selecting different magnitude of changes of the driving forces (D). In the flooding example, forecasts of climate changes (as a driving force (D)) would have consequences on the amounts of rainfalls (pressures (P)) thus with changes on the values of (S) state and (I) indicators.

Multicriteria analysis

Multicriteria analysis (MCA) is a set of methods for supporting the identification of preferences among alternative choices. These methods are widely used in operational research and decision making as a background to Multicriteria Decision Support Systems (Siskos & Spyridakos, 1999). The output of the decision-matrix is a value score provided by a value function. A value function is a mathematical representation of human judgements which permits the translation of the performance of the alternatives into a value score, which represents the degree to which a decision objective is met.

Figure 1 - Structure of the mulino-dss



During the decision process, the whole DPSIR cause-effect chain should be constructed, but in the last decision phase (the choice between the options), the S-I-R sub-chain is involved. The indicators of state (S), from the model runs, are compiled

in a GIS attribute table. The values of the criteria of the indicators are extracted to fill a matrix with the options in the columns and the criteria in the rows (fig.1 point 1.). To be comparable, values are transformed (normalisation, fig.1 point 2.). Then, the end-user must give a weight (fig.1 point 3.) to each criteria by attributing a value following a proposed procedure within the DSS. A value function is applied to the matrix taking the options by pairs. The value function provides a final weight to each management alternative proposed. The options are ranked following their final value (fig.1 point 4.). The option with the highest value is the one that is most appropriate for ameliorating the impact considering the importance of all the criteria.

Hydrological modelling

The role of simulation models in the MULINO-DSS is to allow a sound translation of Responses/Pressures variables into relevant catchment State variables and indicators (fig.1). As explained above, the models give values of indicators of both options and scenarios. As the MULINO project focuses on sustainable uses of water resources at the catchment scale, hydrological modelling plays a key role, but land use change models can also be used in particular for scenario implementation. Each case study in MULINO uses a hydrological model that is most appropriate for the characteristics of the catchment. The models are validated with available data.

Identification of end-users of the mulino-dss

Relationships between social actors are structured in the form of networks that tie individuals together (Degenne & Forsé, 1994). « *Delineation of the social and organisational networks by the scale at which they operate provides a framework within which to examine the potential for integrated and inclusive resource management* » (Tompkins et al., 2002, p1108). Thus, in our aim to develop a tool to support integrated management of water resources at the catchment scale (« local »), it is important to (i) identify the decision tree of the management of water resources within the catchment by the study of institutional regimes, (ii) understand the relationships between the different groups of actors on water resources by the study of local networks, (iii) to identify a suitable user of the MULINO-DSS by exchanging information with the local networks. Regular exchanges with the local networks are important for the construction and implementation of the MULINO-DSS since these networks are dynamic evolving through time.

Why delivering the DSS tool to the river contract in the belgian case study

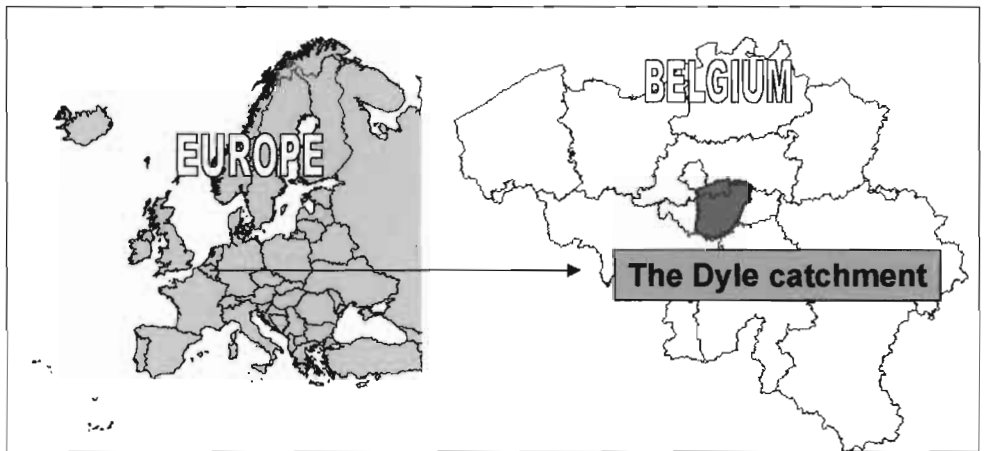
Case study: the walloon part of the Dyle catchment

The part of the Dyle catchment in Wallonia is 650 km² and situated in central Belgium (50°38N, 4°45E) as part of the Sheldt basin (fig.2). At its outlet from Wallonia, the mean discharge is about 4.5 m³/s. The catchment has a population of 200 000 inhabi-

tants in 17 communes, with a population density of 310 inhabitants/km². The domestic effluent of 150 000 inhabitants are currently treated. According to classification for the nitrates directive, the catchment is situated in the vulnerable zone of the Brussellian sands. There are two valleys which are protected zones for European birds. The land use comprises 50% arable land, 22% built-up areas, 9% pastures and 19% non built-up areas with forests and wetlands.

In general, flooding and high levels of nitrates and pesticides in both surface and groundwater are the main pressures on the water resources in the Dyle catchment.

Figure 2 - The Belgian case study of the MULINO project : the Dyle catchment



The fragmented decisional context of water resources management

Legislation concerning water resources was the first theme tackled by the environmental politics of the EU in the 1970's and includes 25 directives. Because of the amount of legislation concerning water resources, a new, more coordinated legislation was requested by the EU Parliament and the Council (Aubin & Varone, 2002). Thus, during the last 10 years, water policies in the EU were revised leading to the Water Framework Directive (WFD) and the cancellation of some of the 25 directives. The WFD represents a new step in EU policy regarding water resources by combining previous policies into a common policy (Aubin & Varone, 2002). This new directive is more ambitious than all previous directives on the management of water resources.

The study of the development of the implementation of previous EU water directives can help in the appraisal of possible difficulties in the implementation of the WFD. Belgium, for example, was one of the European countries that experienced major delays in the implementation of previous directives. Belgium has only just implemented the nitrates directive and its first waste water treatment plant in Bruxelles (2001). An historical analysis of the institutional water regimes in Belgium (Aubin & Varone, 2001) partly explains these delays. A study of the national and local decision context gives a better understanding of the potential for the integration of the management of water resources at the catchment scale.

The decentralisation of the Belgian water policy

Water management in Belgium is fragmented at different administrative levels. Belgium has been a Federal State since 1993. Regions and Communities were added to the existing administration levels of 10 Provinces and 589 communes. The Regions were responsible for environmental issues, including water management since the 1980's. There are three governments for the three regions of Brussels Capital, Wallonia and Flanders, which have their own responsibility for both surface and groundwater management. The attribution to Regions of the management of navigable streams came later, in 1990. In Wallonia, this led to the creation of the « Ministère de l'Équipement et des Transports ». The EU Directives concerning water resources are translated into law in each Region. The 1980's and the beginning of the 1990's were periods of huge adaptation for the regionalised Belgium. The process of regionalisation delayed the translation and implementation of the 1970's and 1980's European Directives concerning water resources (Aubin & Varone, 2001).

Water management in each Region is now completely different. The parts of the Dyle catchment in Wallonia and the parts in Flanders can be considered as two different case studies. Because of this, it was not possible for the MULINO project to work on the whole of the Dyle catchment in developing the DSS. The study deals therefore with water management in Wallonia.

Water authorities in Wallonia

The DGRNE (Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement / General Directory for Natural Resources and the Environment) of the Ministry of the Walloon Region has a water division (Division de l'eau) that is responsible for the coordination of the implementation of water resource management in Wallonia both with respect to surface and groundwater. This division comprises 7 departments (surface waters, non navigable waters, groundwater, sewage treatment, water uses taxes, soil protection, high volume production and transport). Each division has the responsibility for one aspect of the management of water resources within the water cycle. The main objective is the quality concern of both surface and groundwater. Unfortunately, water management plans do not yet exist and the relationships between services, when they exist, are therefore informal.

Within the DGRNE, the maintenance of non navigable streams depends on the catchment area of the streams.

The River Contract in Wallonia

A River Contract (RC) consists of an agreement between the largest possible number of water actors from both the public and the private sectors. It aims at harmonising the diverse uses and functions of the river, its banks and the water resources of the catchment. It encourages the implementation of actions for river management, described in an action plan that derives from the consensus of all the actors listed in the RC agreement. The programme of actions aims to restore, protect and enhance the value of water resources while considering all the characteristics and functions of the river. It also has the role of raising public awareness of sustainable development activities wi-

thin the catchment. The first institutional definition of the RC in Belgium came with the declaration of the regional policy on the 22-01-1992. A « circulaire ministérielle » (18-03-1993) of the Ministry of environment specified the modalities of the development of a river contract in Wallonia. A circular in 2001 from the Ministry of agriculture and rural affairs extended the time period for the implementation of the RC from 4 years to 4 years twice renewable. A RC is developed in 5 phases. (1) The initialisation comes from actors (public as private) who express the wish to create a RC around specific issues. The first programme of actions attributed to the first actors is submitted to the Ministry. (2) The Ministry gives its agreement to the project, defines the coordinator and details the mission. (3) The coordination has to involve the maximum number of actors in the project. A consensus has to be found on a programme of actions based on a detailed inventory of the state of the water resources and the main issues in the catchment. When the consensus is found with a task for concerned actors, the draft treaty is signed. This date marks the beginning of the RC. (4) The programme of actions is implemented, and (5) revised.

The integrated view of water resource issues of the river contract

Even though there was an intention to have a water management plan in Wallonia, this has not materialised because of the traditional « *technico-administrative sectorisation* » of water management (Rosillon, 2001). In this « *sectorisation* », it is difficult to define a single DSS user who could have an integrated view of water issues in the Dyle catchment. This view is needed in order to define indicators and criteria for the MULINO-DSS. Moreover, the MULINO-DSS is not a multi-user tool. Thus, the participatory approach principle can only be implemented within a dialogue and consensus context when the results are entered into the DSS by a single user.

The coordination staff of the RC of the Walloon part of the Dyle catchment is part of the local network established as a first stage of the MULINO project in each case study. The RC of the Walloon part of the Dyle was signed in 1998. This means that the first 4 years of the contract (consisting in the implementation of concerted actions) have already been completed. The main actors for water resources in the Dyle catchment are already discussing some issues together. The most difficult task, to provoke a dialogue between all the actors has, therefore, already been achieved in this case study. The work of the coordination staff leads to a consensus on feasible solutions such as, e.g., the location and the dimension of storm basins, by-pass of the river, awareness on agri-environmental measures and so on... This means that, first, the coordinator of the RC knows personally all the actors concerned with water resources in the catchment. Secondly, he is aware of all the issues for the river management. Thirdly, because of the actions already implemented on the river and on the catchment for solving some issues, he has great knowledge about technical water management at the local level and knows about the establishment of a participatory approach. Finally, the coordinator and all the coordination staff members were motivated to participate in the MULINO project and to exchange knowledge.

The idea is to deliver the MULINO-DSS to the coordinator of the RC who represents a « centralisation » or synthesis of the ideas proposed within the concertation between

all the actors in the Walloon part of the Dyle catchment. The use of the MULINO-DSS could lead to (1) the understanding and acceptance of environmental decisions from the government, or (2) proposals of further management alternatives arising from a consensus. The ultimate objective is to support the RC in its participation in the decision making process concerning water resource management in order to provide a sustainable strategy at the catchment scale.

The key role of GIS-based modelling investigations in the MULINO project development

The figure 3 represents the central position of the database created through GIS platform to establish the linkages between the DPSIR chain linkage, the multi-criteria analysis of the DSS and the models. First of all, the structure of the database and the models required are defined by the needs of the end-users. The DPSIR framework permits to formalize the issues in the catchment. Thus, this orients the structuring of the database. This database, filled by the outputs of models and GIS calculations (other spatial analysis than hydrological models calculations *stricto sensu*), provides then the inputs of the matrices.

Figure 3 - Representation of the central position of GIS-based techniques in the mulino-dss tool

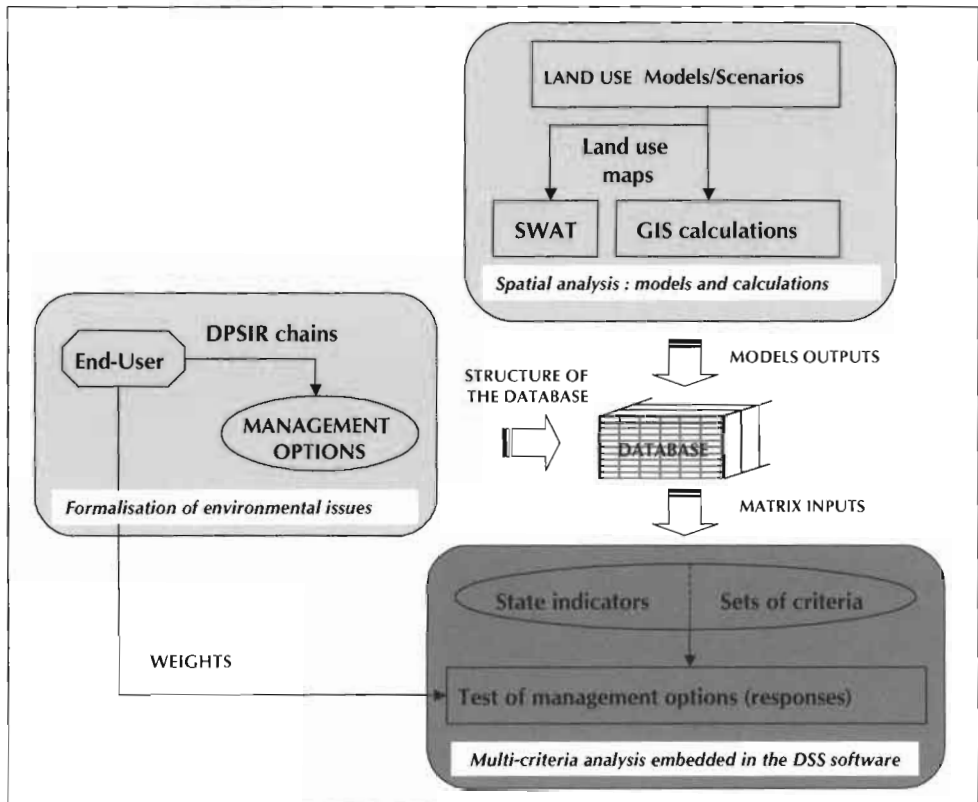
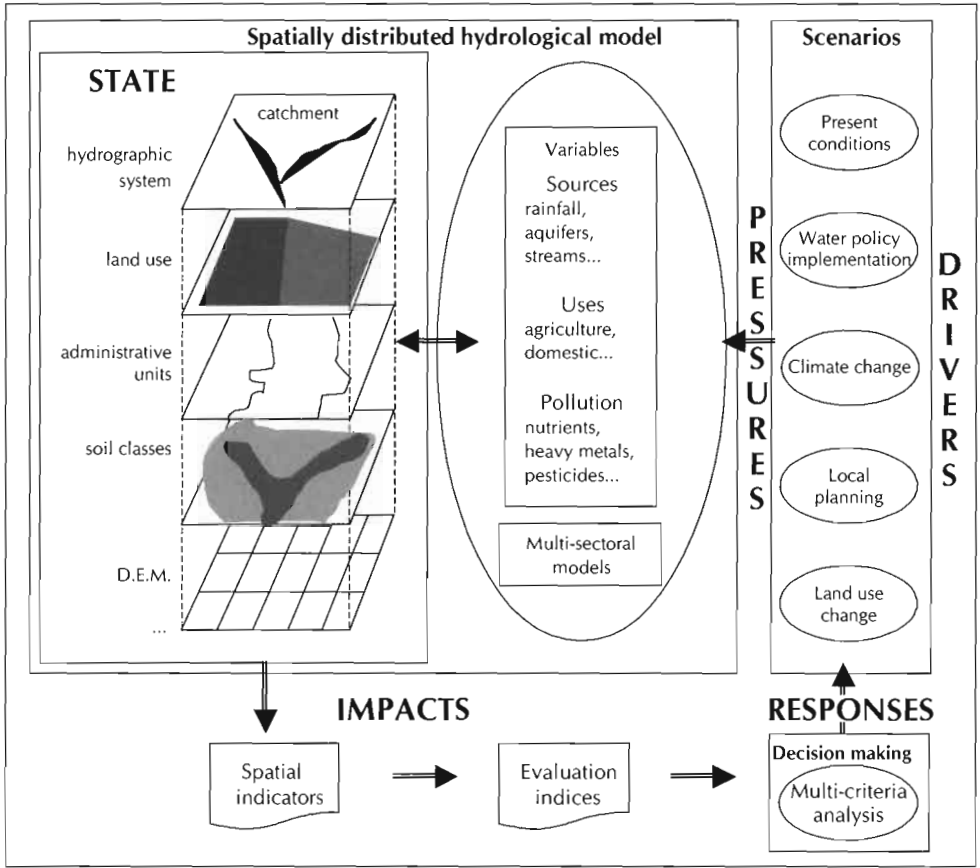


Figure 4 - Scheme of the integration of models outputs in the DPSIR chain linkage



réalisation I. Lajeunesse, 2002

To facilitate exchanges, spatially distributed hydrological models were considered (fig. 4). In addition, the spatially distributed nature of these hydrological models allow to evaluate explicitly the impact of spatially distributed forcing parameters such as soil and land use change on the hydrological responses. To comply with this, we have chosen to use the spatially distributed hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The particular advantage of this model is that it has an ARC-VIEW™ version. This model is thus interfaced with a GIS and the output files created by SWAT can be 'called' from the DSS. This facilitates (1) the pre-and post processing of the model, (2) the study of the impact of spatial resolution on the model outputs of input data such as soil maps, land use maps and digital elevation model, (3) the exchanges with the MULINO-DSS (exploration of available data through the visualisation of GIS files : map layers and relational data bases) and (4) the communication with end-users and stakeholders by showing maps that describe the impacts of management alternatives or scenarios on the state of water resources.

The SWAT model is also an integrated hydrological model, which fits with the river contract expectations. In fact, SWAT integrates many already well-known and well-used models : SWRRB model (Simulator for Water Resources in Rural Basin, 1985), CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, 1980), GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems, 1987) and EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator, 1984). SWAT tackles both quantitative and qualitative issues of water. This model is thus particularly indicated for a multi-sectoral study of water resource management and the preliminary researches for the implementation of the Water Framework Directive. Furthermore, this model is easily downloadable from the web page with free access to it (<http://www.brc.tamus.edu/swat/>). It is also a very well documented model.

Discussion

The MULINO project aims to deliver a Decision Support System to support integrated management of water resources at the catchment scale. The MULINO-DSS is a software based on the European Environment Agency DPSIR (Driving forces, Pressures, State, Impacts, Responses) framework of environmental cause-effect relationships. The software permits to test the relevance of different management alternatives, also called options or responses in the DPSIR linkage chain, proposed by one end-user to solve water resources issues.

To have an integrated view of water resource management the MULINO project has proposed to work with the river contract of the Walloon part of the Dyle catchment for the belgian case study. Delivering the DSS tool to the coordinator of the river contract is original and suitable for the integration of the management of water resources at the catchment scale. By original we mean that existing local networks of integrated water management are used. By suitable we mean that the methodology fits with the participatory approach principle required by the Water Framework Directive to provide sustainable management of water resources in Europe.

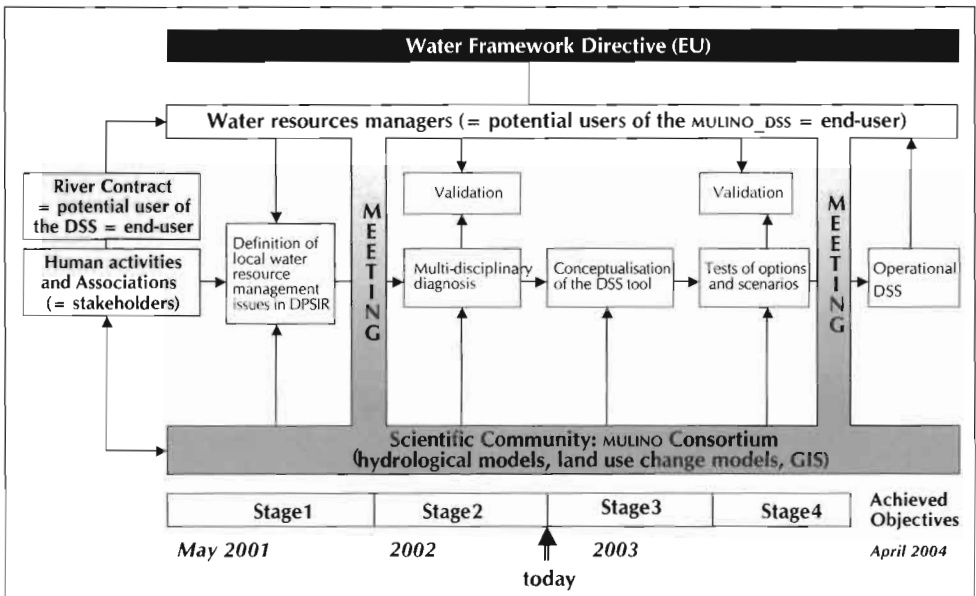
The DSS is interfaced with GIS to facilitate exchanges between research investigations and decision making procedures by supporting (i) the construction of a common database, (ii) the study of the impact of spatial resolution of input data on the model outputs, (iii) the communication with end-users and stakeholders through the construction of maps that describe the impacts of management alternatives or scenarios on the state of water resources.

However, the use of spatially distributed modelling techniques suffers from some drawbacks. Firstly, the data demand is high. In many cases, required data are not completely available as well for quantitative and qualitative issues. This means that the successful use of GIS techniques is conditioned to the enormous amount of work (and cost) to built an accurate database. Secondly, the determination of the error generated by the linkage of different layers, with different spatial resolution and with their own endogenous error is a real limit to the interpretation of the work. Finally, spatially distributed models require advanced computer power and data processing to be run. For

all these reasons, research investigations on GIS-based techniques are time consuming investigations.

At the moment, a database of spatial information of good quality has been compiled for the Dyle catchment case study of the MULINO project with the description of water management issues in the Dyle catchment following the DPSIR framework. The next steps for MULINO are to finalize the development of the DSS software and to implement the DSS interfaced with hydrological models GIS-based to test management alternatives and scenarios. The figure 5 gives an overview of the main components and phases of the MULINO project.

Figure 5 - The workplan of the MULINO project



réalisation I. Lajeunesse, 2002

Acknowledgments

This study is supported by the 5th Framework Programme of the European Communities, the Directorate General Research and the Energy, Environment and Sustainable Development Programme. Our special thanks go to the MULINO project colleagues and the coordinator of the “Contrat de Rivière Dyle” J.-M. Tricot for their helpful and extensive advice throughout this project.

References

AUBIN D., VARONE F. *La gestion de l'eau en Belgique : Analyse historique des régimes institutionnels (1804-2001)*. Courrier Hebdomadaire du CRISP (Centre de Recherche et d'Information Socio-Politique) n° 1731-1732, 2001. 75 p.
 AUBIN D., VARONE F. *European Water Policy. A path towards an integrated resource*

- management In Water Regimes in Europe*. Kissling-Näf, Ingrid & Stefan Kuks : Kluwer Academ. Pub., 2002. *in press*.
- CICIN-SAIN B., KNECHT W. R. *Integrated Coastal and Ocean Management. Concepts and Practices*. Island Press, 1998, 517 p.
- DEGENNE A., FORSE H.-B. *Les réseaux sociaux*. Paris : Armand Colin, 1994. 288 p.
- DENSHAM J.P. *Spatial Decision support systems*. MAGUIRE D. J., GOODCHILD M., RHIND D. W. *Geographical information systems, principles and applications*. Harlow, UK : Longman Scientific & Technical, 1991, 403-412.
- EEA. *Environmental indicators : typology and overview*. Technical Report n°25, 1999, 19 p.
- GAYTE O., LIBOUREL T., CHEYLAN J.P., LARDON S. *Conception des systèmes d'information sur l'environnement*. Collection Géomatique, Hermès, 1997, 153 p.
- J.O.CE. *Directive 200/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau*, 2000, 71 p.
- LUITEN H. *A legislative view on science and predictive models*. Environ. Pollut. Elsevier : 1999. 100 : 5-11.
- OECD. *OECD core set of indicators for environmental performance reviews*. Paris : Environment monographs n°83. 1993. 39 p.
- ROSILLON F. *Vers le développement durable dans le domaine de l'eau : apports d'une gestion locale et participative. Application à la gestion de l'eau en région wallonne à travers l'expérience des contrats de rivière*. Thèse de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise : 2001, 271 p.
- SHIM J.P., WARKENTIN M., COURTNEY J.F., POWER D.J., SHARDA R., CARLSSON C. *Past, present, and future of decision support technology*. Decis. Support Syst., 2002, 33: 111-126.
- SISKOS S., SPYRIDAKOS A. *Intelligent multicriteria decision support: overview and perspectives*. Eur. J. Oper. Res., 1999, 111:236-246.
- TOMPKINS E., ADGER W.N., BROWN K. *Institutional networks for inclusive coastal management in Trinidad and Tobago*. Environment and Planning A, 2002, 34:1095-1111.

Téledétection et SIG : un apport concret à l'étude et à la gestion des pâturages andins dans la IV^e Région¹ du Chili

Héctor REYES, Pablo ALVAREZ, Rodomiro OSORIO, Universidad de La Serena, Chile.
Yveline PONCET, Tchansia S. KONÉ, IRD Orléans, France.
E-mail : freyes@userena.ch

Résumé : Le projet de recherche « Diagnostic et suivi des pâturages andins de la Province du Limarí, IV^e Région », initié en 2001, concerne l'étude des pâturages de la haute cordillère² andine, et en particulier celle de leur exploitation dans un système de transhumance caprine. Ce projet, né d'une demande du service de l'agriculture et de l'élevage (Servicio Agrícola y Ganadero : SAG) de la IV^e Région, a été financé par le Fond de développement régional. La mise en œuvre a été confiée au département d'Agronomie de la Faculté des Sciences de l'université de La Serena sur une durée de quatre ans (2001-2004) et doit couvrir les trois provinces qui constituent la IV^e Région. Il ne sera question ici que de la première étape, 2001-2002, qui concerne la province du Limari. Cette première étape a eu pour objectifs la production de cartes de variables physiques (topographie et pentes, exposition des versants), de sols et de formations végétales. Des informations ont été également rassemblées sur les variables relatives au pastoralisme dans les unités traditionnelles de gestion « posturas », pâtures. L'analyse d'images Landsat ETM a permis de construire plusieurs bases de données et d'alimenter un système d'information géographique.

Mots clés : pâturages andins, élevage caprin, transhumance, milieux semi-arides, SIG, Chili.

Remote sensing and GIS : a contribution to the study and to the management of grazing lands in the Andes mountains (4th region of Chile)

Abstract: The « Diagnostic and monitoring of andean grazing lands of Limari district, 4th region » research project began in 2001. It studies pasture lands in the high andean mountains and focuses particularly their use through a goat transhumant system. The project was initiated to answer the request of a government livestock service (Servicio Agrícola y Ganadero : SAG) in the 4th region, and was supported by the regional development fund (FNDP). The implementation was performed by the Agronomy Department of La Serena University, with a duration of four years (2001-2004). It had to cover the whole three districts of the 4th region. The present paper describes the first stage, 2001-2002, relative to the district of Limari, for which the purpose was the production of maps of biophysical parameters (topography, slopes, aspects) and of soils and plants associations. Meanwhile, data were collected on variables of pastoral farming in the traditional management units know as « posturas ». Image analysis of Landsat ETM scenes produced several data bases and the first elements of a geographical information system.

Key words : andean grazing lands, goat herding, transhumance, semi-arid environment, GIS, Chile.

¹ Le Chili est divisé administrativement en treize Régions. La IV^e se trouve à 500 km au Nord de Santiago.

² Cordillère : nom donné aux espaces de la cordillère des Andes utilisés par les transhumants comme pâturage. Notons que tous les espaces de la Cordillère sont appropriés.

Introduction

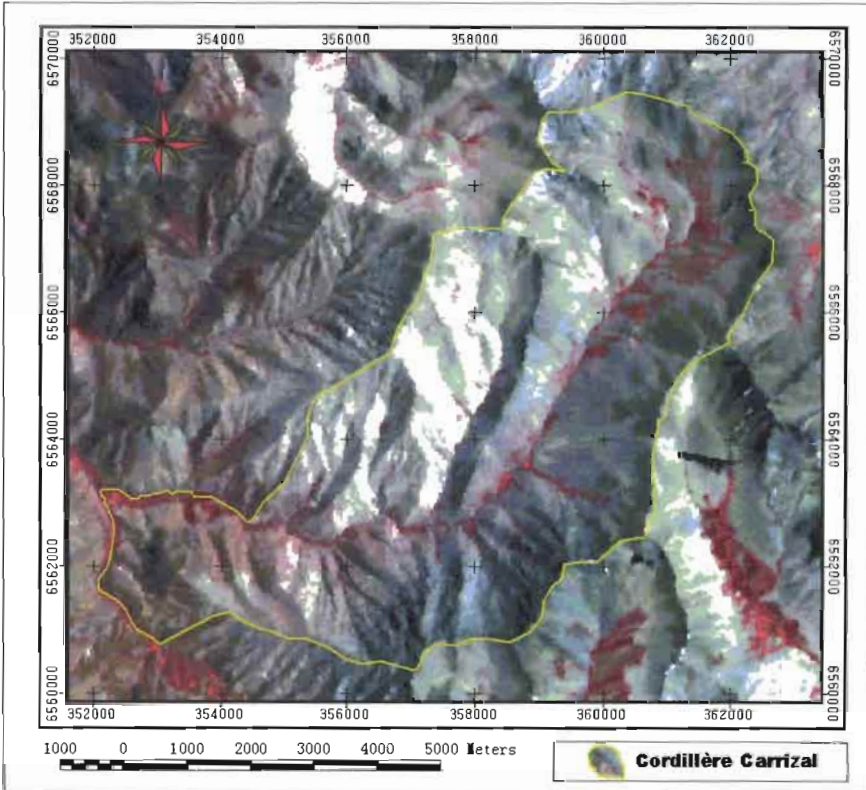
L'élevage transhumant caprin fait partie de la réalité historique, économique et socio-culturelle de la IV^e Région du Chili. Au moment de la croissance des pâturages, au printemps et au début de l'été (octobre à janvier), les éleveurs commencent la migration saisonnière à la recherche d'herbe pour leurs animaux. Or, si les superficies consacrées à la pâture sont connues, leur productivité n'a pas encore été caractérisée ni quantifiée.

Il faut savoir que le Chili a mis en place une politique de surveillance phyto- et zoo-sanitaire qui lui permet d'afficher la parfaite qualité sanitaire de ses produits, reconnue sur le plan international. Cependant l'Argentine, État voisin, a présenté en 2000 des cas de fièvre aphteuse, maladie à haut risque de contagion : afin d'éviter la propagation de la maladie au Chili, le passage – et surtout le retour - d'animaux chiliens à travers la frontière a donc été formellement interdit. Or les pâturages argentins constituaient une ressource fourragère particulièrement appréciée et l'interdiction de passage s'est traduite sur le versant chilien des Andes par une fréquentation plus longue et une pression pastorale plus élevée. Aire frontalière et territoire inhabité, mais pourvu d'herbages, d'eau et de ressources minières, les espaces andins constituent un enjeu géopolitique plus important que pourraient le laisser croire leur apparente productivité naturelle. Il s'en suit une forte demande d'informations détaillées sur la productivité des cordillères chiliennes afin d'orienter les décisions publiques et privées vers une utilisation rationnellement contrôlée des espaces andins. Le gouvernement régional a donc appuyé l'initiative du service de l'agriculture et de l'élevage (SAG) pour conduire l'étude Diagnostic et suivi des pâturages andins de la IV^e Région : étape Province du Limarí, confiée au Département d'agronomie de l'université de La Serena. Son objectif principal est de caractériser les sols, les ressources fourragères et la demande pastorale. Les informations ont été recueillies par observations d'échantillons sur le terrain, analyses d'images de télédétection et enquêtes auprès des éleveurs. La demande des éleveurs en disponibilité fourragère et en espaces pâturables a été étudiée en prenant comme unité d'espace l'unité de gestion pastorale appelée «*postura*».

La *postura* est l'unité de gestion pastorale, reconnue aussi bien par les éleveurs (qui la louent) que par le propriétaire. Elle correspond à un pâturage, c'est à dire à un espace naturel dont la localisation et les limites, les propriétés pastorales (altitude et orientation, qualité de l'herbe, présence d'eau) et l'identité foncière sont parfaitement connues et prévisibles. L'unité foncière, celle qui correspond à une *propriété* (une *hacienda*) regroupe plusieurs *posturas* et est appelée *cordillera*. Chaque *cordillera* correspond aussi à un bassin-versant secondaire (ou tertiaire) du Rio Grande et de ses affluents. Il y a donc correspondance, à ce niveau de gestion, entre l'espace physique (le bassin-versant) et l'espace social (la propriété). L'exemple de la figure 1 montre la *cordillera* Carrizal qui correspond au bassin-versant du cours d'eau qui porte le même nom. Puisque les propriétés foncières se superposent aux bassins-versants, les bases de données peuvent être coordonnées aisément en termes hydrologiques (eau et neige). Le terme de *veranada* a une connotation autant temporelle que spatiale : au cours de la pâture en montagne, un troupeau occupe (en espace et en temps) succes-

sivement plusieurs *veranadas*, éventuellement dans plusieurs *cordilleras* distinctes. On voit ainsi qu'il conviendra de préciser fréquemment par la suite si le même terme est utilisé dans son sens bio-physique (topographie, sols et productivité végétale) ou dans son sens social (unité de gestion foncière). Ajoutons que *veranada*, *postura* et *cordilleras* ne s'appliquent qu'à des espaces occupés saisonnièrement, non artificialisés par l'exploitation ou l'habitat.

Figure 1 - Image Landsat TM de la *cordillera Carrizal*



L'objectif de gestion s'inscrit dans le cadre de multiples niveaux d'organisation :

- le développement régional d'une production laitière déjà existante et de grande qualité, afin d'exporter sur le marché national chilien et sur le marché international (pays andins proches, Brésil, Amérique du Nord, Europe) ;
- la conservation d'un système d'exploitation fondé sur la transhumance, en dépit des aléas climatiques (sécheresses), politiques (fermeture de la frontière) et socio-économiques (débouchés de la production, accès aux pâtures).

Il s'agit donc de bien connaître à la fois le système de production de biomasse naturelle et, à l'autre bout de la chaîne, le système social et économique qui gouverne l'accès à cette biomasse.

Dans un environnement foncier de grandes propriétés et de tradition écrite, une partie du second système est déjà assez bien connue, c'est celle des comportements et stratégies des propriétaires des estives. Les comportements, stratégies et capacités de changement des éleveurs (propriétaires de bétail et /ou conducteurs et bergers) ne sont guère connus en revanche, ou plus exactement la variété de ces stratégies, les comportements et la rapidité de leurs transformations ne sont pas entièrement identifiés.

Le programme est donc destiné à acquérir et à restituer l'information utile à la prévision relative aux choix possibles pour leurs estives par les éleveurs transhumants fréquentant les espaces montagnards. L'un des objectifs – à réaliser ultérieurement – étant de construire un modèle de prévision (ou plutôt de simulation) de la régénération des unités végétales, non seulement en fonction des nivométrie et pluviométrie naturelles, mais aussi en fonction des comportements pastoraux. Les relations eau-sol-plantes qui nous intéressent donc ici vont de la molécule à la «cordillera», une gamme d'échelles peu couramment prise en compte dans les systèmes d'information géographique.

La construction du SIG : quelques précisions

La zone étudiée couvre seize bassins-versants, c'est à dire seize *cordilleras* (fig.1) dont la superficie est de 224 000 ha. Les données sont principalement issues d'observations de terrain, secondairement des fiches de contrôle des *veranadas* par le SAG et de la bibliographie sur le sujet. Les bases topographiques ont été d'une part la cartographie de l'*Instituto Geográfico Militar* (IGM), d'autre part la base de données géographiques du SAG. Pour la construction du système d'information géographique, nous avons employé ArcView et ses extensions Spatial Analyst et 3-D Analyst.

Comme cela s'est fréquemment produit dans d'autres opérations depuis que les SIG sont devenus courants, l'objectif de départ (la construction d'un SIG pour la gestion pastorale) a été très vite élargi, ne serait-ce que pour afficher clairement la rentabilité de l'opération, *via* des usages multiples (explicites ou non) et l'exploitation de ses bases de données spatialisées par d'autres acteurs.

Six thèmes pertinents ont été couverts, dont les informations ont été intégrées dans les bases de données correspondantes. Les bases ont été construites indépendamment les unes des autres afin d'éviter que leurs jointures soient *a priori* redondantes :

- l'altitude, primitives linéaires ;
- l'hydrographie, primitives linéaires et surfaciques ;
- les sols, primitives surfaciques ;
- la végétation, primitives surfaciques ;
- les troupeaux, primitives surfaciques ;
- l'organisation administrative et foncière, primitives linéaires, surfaciques et ponctuelles.

Pour l'altitude, l'hydrographie et l'organisation administrative et foncière, l'information thématique localisée existait préalablement à la construction du SIG. Pour les trois

autres, toute l'information était à acquérir et à organiser en classes localisées et délimitées. Ce sont ces trois thèmes que nous allons détailler plus loin. En ce qui concerne les sols et la végétation, les valeurs radiométriques d'images de télédétection satellitale ont été les principales sources d'information, avec les observations de terrain.

Les données radiométriques sont issues d'enregistrements Landsat TM à deux dates, le 19 décembre 2000 et le 13 janvier 2001, et dont la résolution spatiale est de 30 m. Pour le traitement des images satellitales, c'est le logiciel ERDAS Imagine 8.5 qui a été utilisé.

Les images ont fait l'objet de traitements radiométriques classiques (corrections géométriques, calculs d'indices et applications de filtres, classifications supervisées et non supervisées), destinés à les rendre plus lisibles et à atténuer l'hétérogénéité texturale des valeurs d'origine.

Les images ont été géoréférencées pour repérer les *posturas* et les *cordilleras*. Ce sont ces images géoréférencées qui ont servi sur le terrain pour différencier, localiser et caractériser les unités de sol et de végétation. La superficie minimale retenue est de 6,25 hectares. La base cartographique numérique de l'IGM a servi pour les corrections géométriques (ellipsoïde International de 1924 et système de Coordonnées UTM). Une partie de la zone à couvrir n'a pas fait l'objet d'études directement sur le terrain : les unités homogènes de sols et de végétation y ont été obtenues par classification supervisée.

La granulométrie spatiale utile (c'est à dire considérée comme nécessaire et suffisante) a été définie comme étant celle de la carte topographique IGM à 1/25 000. Il a donc suffi de numériser les coupures pour obtenir la couche de base du SIG, correspondant au thème relief, au thème hydrographie et au thème organisation administrative et foncière. Les autres thèmes du SIG de gestion pastorale, et éventuellement les thèmes qui pourraient être ajoutés plus tard, se réfèrent à cette base. Dans le cas de la haute montagne de la IV^e Région du Chili, l'information foncière pastorale a été directement issue des données relief et hydrographie, puisque *posturas* et *cordilleras* correspondent à des bassins-versants clairement identifiés.

Les bases de données spatialisées peuvent être interrogées à l'échelle des divers niveaux d'organisation administrative : Région, Province, Commune, *cordillera*, *postura*. La granulométrie la plus fine se retrouve cependant à tous les niveaux de restitution de l'information que propose le système.

Dans ce milieu de haute montagne et de pentes parfois très fortes, la construction d'un modèle numérique de terrain a été la première étape du travail, afin qu'il constitue le support commun à tous les autres paramètres. Notamment, il produit directement les valeurs des variables importantes que sont l'orientation, la pente et l'altitude, pertinentes pour l'analyse et la prévision de la couverture végétale saisonnière.

L'un des objectifs du programme étant de fournir des outils de gestion aux trois niveaux de la décision et de la gestion administratives (région, province, commune), la base topographique a été conçue selon trois formats, adaptés chacun à une gestion : des cellules de 90 m, 75 m et 60 m de côté ont été choisies pour l'altitude et

l'orientation, aux échelles régionale, provinciale et communale respectivement. Une dimension plus fine, 50 m de côté, a été choisie pour l'altitude, la pente et l'orientation des *posturas* et des *cordilleras*. Les grilles *raster*, sont donc différentes selon les quatre niveaux d'organisation. Les images vont ensuite être converties en format vecteur pour être intégrées dans la base de données.

Trois thèmes : sols, végétation, troupeaux

Nous développons ici brièvement quelques éléments de méthode sur *sols*, *végétation* et *demande pastorale*.

Classiquement, dans la confection d'un système d'information géographique de cette nature, c'est à dire fondé en premier lieu sur les données radiométriques de surface, les unités spatiales des thèmes bio-physiques (sols et végétation) sont identifiées et enregistrées à partir de l'homogénéité de la valeur et de la texture radiométriques : on peut dire que le thème choisi définit ses contours, souvent variables dans le temps (lac, végétation active). En revanche, les unités spatiales du thème social (troupeaux) ont été complètement pré-définies et correspondent au découpage foncier « historique » en *posturas* et *cordilleras*. Dans le cas sans doute très particulier de la IV^e Région du Chili, certaines unités du découpage foncier correspondent aussi à des unités physiques et biophysiques, on l'a vu plus haut. Nous sommes alors dans un cas où le difficile raccord entre les deux concepts est déjà fait, grâce à la continuité de l'histoire socio-politique de ce secteur. Une partie du problème de la relation entre les deux catégories de clés géographiques est ici résolue.

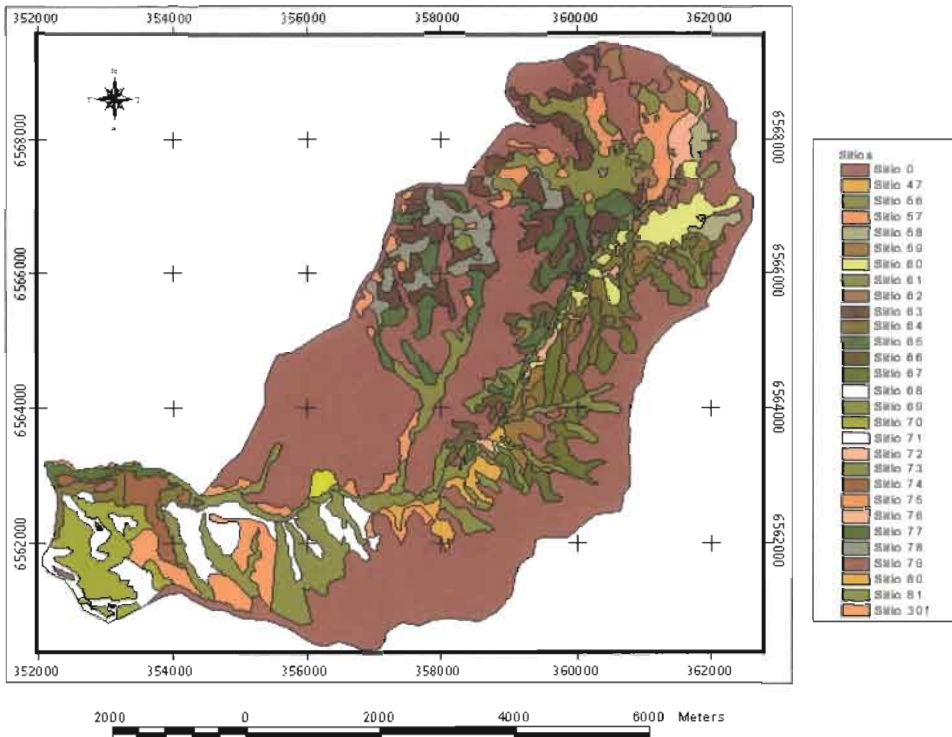
La base de données Sols

Gastó et al. (1996), écrivent que l'homogénéité édaphique définit l'homogénéité de la végétation et c'est pourquoi nous avons suivi leur méthode pour construire la base de données spatialisées sur les sols, par unités de sol homogènes. Les critères que nous avons retenus sont au nombre de six : texture - profondeur – hydromorphie – pente – orientation - pierrosité. Le nombre d'observations et la description des sites ont été faits en suivant les normes correspondant à l'échelle de restitution 1 : 25 000. L'analyse des images Landsat TM en fausses couleurs a précédé le travail de terrain, puis les relevés de terrain ont été effectués, soit par simple observation physiographique (notamment dans les zones d'accès difficile), soit de façon plus détaillée en prélevant des carottes à la tarière. Les relevés de terrain proprement dits, toutes catégories confondues, ont couvert 80 % du territoire à analyser.

On a ainsi obtenu une base de données à 6 variables et environ un millier d'observations. Les variables de chaque observation ont été intégrées selon la formule de Jenny (Jenny, 1941) et selon la *méthode physiographique* dans laquelle une unité de sol est reconnue comme homogène en fonction du climat, du matériel d'origine, de la topographie, de la vie dans le sol et de la durée d'évolution. Ce choix a donc enrichi la méthode Gasto.

Les modalités de chacune des variables de sols ont été l'objet d'une double classification simplificatrice : la première, sur le terrain, en conservant les classes détaillées du système américain (20 classes de texture, par exemple) ; la seconde au laboratoire, par regroupement de ces classes afin de n'obtenir que 3 classes de texture, pour garder cet exemple.

Figure 2 - Les unités de sols homogènes de la *cordillera Carrizal*



Parmi les six variables caractérisant chaque unité de sol homogène, les attributs de pente et orientation sont issus du modèle numérique de terrain, les attributs des quatre autres (texture, profondeur, hydromorphie, pierrosité) sont issus des relevés physiographiques. La base de données *sols* ne conserve, pour chaque unité homogène, que les classes simplifiées des variables. Dans l'ensemble de ces acquisitions de données, la télédétection (aérienne ou satellitaire) n'a joué aucun rôle puisque les variables physiographiques ne s'inscrivent pas directement en surface. Néanmoins, c'est au moyen des images Landsat TM qu'ont été différenciées les aires décrites comme « sols » au sens pédologique et les aires dépourvues de sol (roches nues et éboulis), ces dernières représentant entre 40 et 50 % de la surface de chaque *cordillera*.

La figure 2 montre les *sitios*, c'est à dire les unités homogènes de sols telles que définies par six paramètres, généralisés au niveau d'une *cordillera* (celle de Carrizal, comme précédemment). Il est prévu de déterminer les variables de description de sols

nécessaires et suffisantes pour corrélérer les unités de sols et les unités de végétation et construire ainsi les unités physiographiques de paysages.

La base Végétation

Les formations végétales ont été décrites en s'inspirant de la méthode de cartographie de l'occupation de l'espace par Etienne et Prado (Etienne et Prado, 1982). À partir d'images satellitales au 1/25 000 et d'observations directes sur le terrain, ont été définies et tracées des unités homogènes de végétation. Celles-ci ont été décrites selon trois critères.

- La structure verticale et horizontale : le couvert végétal a été décrit en 4 strates : ligneux hauts (plus de 2 m), ligneux bas (moins de 2 m), herbacées et succulentes. Le recouvrement horizontal des strates a été estimé par transects linéaires dans le cas des ligneux et par la méthode des points quadrats pour les herbacées.
- La composition floristique : les strates ainsi définies correspondent aussi aux types biologiques d'Etienne et Prado (*op. cit.*) qui caractérisent la physionomie des unités végétales. Les espèces dominantes de chaque type biologique ont été recensées.
- Le degré d'anthropisation, mesuré au moyen de deux paramètres : l'artificialisation visible et le pourcentage de sol nu. L'artificialisation a été estimée visuellement selon une échelle définie *a priori* pour chaque unité de végétation (Di Castri, 1968). Le pourcentage de sol nu a été estimé à partir des mesures de recouvrement végétal.

La figure 3 montre la carte des unités homogènes de végétation, généralisée au niveau de la « cordillera » Carrizal. Notons la classe « herbacées denses » qui correspond au milieu des prairies humides (vegas), réputé le plus productif et le plus important pour l'élevage caprin.

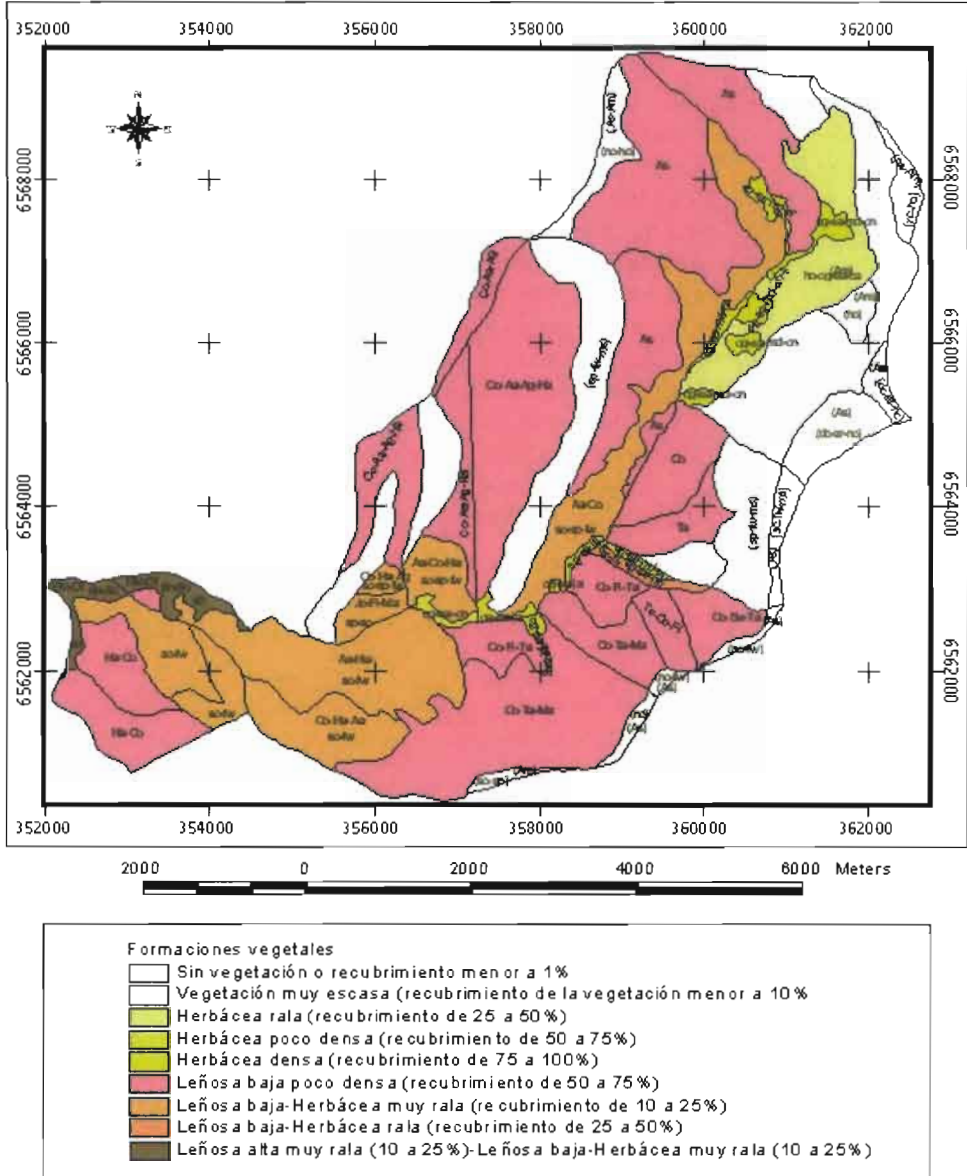
La base Troupeaux

L'origine de cette base est le relevé annuel du SAG régional, qui dénombre le cheptel par «postura» et par troupeaux. Un troupeau est constitué du bétail d'un ou plusieurs éleveurs, qui est gardé ensemble par le ou les mêmes bergers et fréquente la même pâture. Les données de ce relevé qui ont été sélectionnées pour la base « troupeaux » s'étendent sur les onze années comprises entre 1989 et 2000, c'est à dire sur les onze étés compris entre 1988-1989 et 1999-2000.

Pour chaque saison, le SAG recense le nombre de bêtes de chaque espèce, par troupeau, «postura» et cordillère, et les dates d'estive, le tout référencé sous le nom de l'accompagnateur du troupeau. Cet accompagnateur peut être l'un des propriétaires des bêtes ou un parent (souvent une épouse), ou un membre de la société fromagère qui exploite la production du troupeau : cette clé est une source d'incertitude dans la base de données, incertitude en partie compensée en prenant la «postura» comme unité minimale d'identification. Cette solution n'est pas entièrement satisfaisante puisque dans une «postura» on peut trouver plusieurs troupeaux. Dans cette conception de la base de données « troupeaux », les traitements de l'information ne peuvent donc produire que des informations spatiales qui sont inexploitable au niveau social. Néanmoins, les données permettent de calculer un « Equivalent Unité Animale » rapportant

toutes les espèces à une unité unique, et de la rapporter aux superficies des posturas par unité de temps : ici, par jour.

Figure 3 - Formations végétales de la cordillera Carrizal



Dans chaque *postura*, les années sont classées par ordre d'importance du cheptel accueilli, puis, d'après cette information, toutes les *posturas* sont classées selon un ordre de probabilité. La probabilité d'excédence par *postura*, actualisée et rapportée au

nombre d'équivalent unité bétail de l'année en cours, donne une estimation statistique calculée d'un risque de sur-fréquentation ou de sous-fréquentation des *posturas*. Elle fournit surtout, et c'est important pour la gestion pastorale, une durée calculée de stationnement des troupeaux dans chaque «*postura*», en nombre de jours. On peut alors effectuer un classement des *posturas*, éventuellement rediriger les troupeaux, voire comparer les locations de pâtures dans la même classe de *posturas*.

Ce sont ces données statistiques et probabilistes sur les *posturas* qui seront superposées aux données d'observation et de mesures contenues dans les bases « Sols » et « Végétation » afin d'affiner les résultats et les prévisions aussi bien quantitatifs (en équivalent unités bétail) que temporels (nombre de jours de présence) et spatiaux (localisations précises et superficies réellement disponibles) dans chaque «*postura*» et «*cordillera*».

Discussion

Plusieurs points méritent une analyse critique et éventuellement une redéfinition au moins partielle des critères et des méthodes.

D'une part, il faut s'interroger sur l'adéquation des classifications et méthodes utilisées pour décrire le milieu bio-physique (sols et végétation), s'agissant ici de haute montagne aride, dans laquelle les dites classifications et méthodes n'ont pas été spécifiquement conçues : les sols nus, notamment, n'y sont pas un indicateur pertinent d'artificialisation du milieu. L'analyse attentive des images satellitales, combinée avec les études de terrain spécifiques, peuvent, dans une certaine mesure, apporter des éléments d'affinement, voire de mises à jour. Il sera sans doute nécessaire alors de rechercher des indices de végétation et des indices d'albedo spécifiques à ce milieu particulier pour améliorer l'information (sur la pierrosité notamment), en tenant compte des pentes, des orientations et des ombres. C'est là que l'association avec le modèle numérique de terrain sera très utile.

Par ailleurs, les images de télédétection doivent être utilisées pour des actualisations en temps presque réel en cas de modifications notables du milieu (après des épisodes climatiques paroxystiques, des « catastrophes » telles que avalanches et éboulements, artificialisations ou pollutions d'origine minière, par exemple). Les données de télédétection sont déjà très utilisées et le seront probablement davantage dans le futur, sur ce type de terrain difficile à parcourir au sol. Ceci dit, la résolution spatiale des images Landsat TM n'est pas entièrement satisfaisante dès lors que certaines unités homogènes de végétation comme les vegas (les prairies de montagne humides, irriguées ou naturelles) sont difficiles à repérer : de petite taille, allongées auprès des talwegs et souvent non connectées entre elles, elles sont pourtant de grande importance dans l'alimentation du bétail et le système socio-économique caprin dans son ensemble.

On pourra aussi discuter le niveau spatial de désagrégation de l'information : les études qui commencent en 2004 montreront si l'unité «*postura*» et l'unité «*cordillera*» sont réellement pertinentes pour un travail sur les problématiques sociales de la transhumance caprine du point de vue des éleveurs eux-mêmes.

Enfin, on a vu plus haut que les données sociales relatives aux troupeaux (« l'identifiant du troupeau ») sont difficilement exploitables directement dans une base de données spatialisée en conjugaison avec des données d'observation du milieu naturel. Ce sera l'un des objectifs des travaux à venir que de proposer aux différents partenaires de l'étude des pâturages andins des *clés relationnelles* plus précises et plus exploitables dans un SIG.

Conclusion

Le SIG et la télédétection sont des outils de grande valeur pour la recherche appliquée sur la gestion des pâturages andins en IV^e Région. Ils ont permis de traiter une grande quantité d'informations sur un territoire diversifié de grande étendue. Les caractères des sols et des formations végétales et des indicateurs statistiques pastoraux ont ainsi alimenté une banque de données spatialisée sur la Province du Limari. L'information générée par ce travail va être utilisée principalement pour la prise de décisions sur la gestion des pâturages andins. Il sera nécessaire toutefois de produire d'autres informations liées à la productivité des pâturages afin de réduire les risques et de parvenir à des décisions raisonnées et justifiables.

L'ensemble de l'information générée par le SIG (pour le construire et comme résultat de son exploitation) servira également de point de départ à des recherches dans des domaines multiples : agronomie, botanique, géologie, écologie, économie, climatologie, entre autres. Plus important, la construction spatiale du SIG « Limari », fondée sur une unité sociale (la « postura ») oblige à réfléchir sur la combinaison des concepts biophysiques et sociaux pour exploiter avec efficacité les bases de données éventuellement conçues pour des objectifs différents. Ceci pose la question de l'adéquation des multiples niveaux d'organisation du fait social aux granulométries spatiales nécessaires et suffisantes pour les milieux dits « naturels », supposées plus simples.

Bibliographie

- CORPOICA, 2001. *Plan de manejo sostenible y ecosistemas regionales*. Documento sin edición. Disponible. In www.corpoica.org.co/html/planes/ecosistema/texto/ecosistemas.html.
- COVACEVICH N. 2001. El coironal y las necesidades de los ovinos. *Tierra Adentro* 41: 30-33.
- DEGEORGIS A., y MIRANDA O. 2001. *Evaluación económica del impacto ambiental de actividades pecuarias transhumantes: una propuesta metodológica*. Documento sin edición. Disponible in <http://www.unq.edu.ar/theomai/artmiranda001.htm>.
- DI CASTRI F., 1968. Esquisse Ecologique du Chili. In Delamare-Deboutville, C. et Rapoport, E. (Eds.). *Biologie de l'Amérique Australe*, Vol IV. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
- ETIENNE M. & PRADO C., 1982. Descripción de la Vegetación mediante la Cartografía de Ocupación de Tierras. *Ciencias Agrícolas* N° 10. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales, Universidad de Chile. 120 p.
- GAJARDO R. 1995. *La Vegetación Natural de Chile. Clasificación y Distribución Geográfica*. Editorial Universitaria. 165 p.

- GASTÓ J., 1996 : *Ordenamiento del espacio rural, manual de aplicación a municipios y predios*. Santiago de Chile. 283 p.
- JENNY H., 1941. *Factors of soil formation*. New-York, Mc Graw Hill. 289 p.
- LONG G. 1959. Description d'une méthode linéaire pour l'étude de l'évolution de la végétation. *Bulletin du Service de la carte Phytogéographique, série B, tome III, fascicule 2* : 107-128.
- LÓPEZ C., CABEZAS R. y OSORIO R. 1979. *Evaluación de las veranadas de la Provincia del Elqui, IV Región de Coquimbo*. Instituto de Investigación de Recursos Naturales.
- MARTICORENA C. & QUEZADA M., 1985. *Catálogo de la flora vascular de Chile*. Gayana. Botánica, Volumen 42-Núm.1-2. Universidad de Concepción-Chile. 157 p.
- MENESES R., SQUELLA F., y CAMACHO O. non daté. *Desarrollo sustentable de los altos valles andinos argentinos-chilenos, Provincia de San Juan-Región de Coquimbo. Caso chileno*. Document de travail non publié.
- MORALES L., SANTIBÁÑEZ F., DE LA FUENTE A., y URIBE J., 1998. Monitoring desertification using remote sensing techniques. In *ELMS, an environmental information and modeling system for sustainable development*, F. Santibañez y V. Marín, eds. Chapter 7. Santiago du Chili.
- MUELLER-DOMBOIS D & ELLENBERG H., 1974. *Aims and methods of vegetation ecology*. Wiley & Sons, New York, U.S.A. 545 p.
- MUÑOZ P., C., 1966. *Sinopsis de la Flora de Chile*. Universidad de Chile, 2ème éd.. 500 p.
- OVALLE C., AVENDAÑO J., ETIENNE M., MUÑOZ M., y SERRA M.T., 1981. Determinación del valor pastoral en praderas naturales de la zona Mediterránea subhúmeda y su relación con la carga animal. *Agricultura Técnica*, 41(4) : 221-231.
- OVALLE C., y SQUELLA F. 1996 : Terrenos de pastoreo con pastizales anuales en el área de influencia climática mediterránea. In *Praderas para Chile*, I. Ruiz, éd., Capítulo 23, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- SQUEO F.A., G. ARANCIO y J.R. GUTIERREZ (Eds.), 2001. *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo*. Universidad de La Serena. La Serena. Chile. 372 p.

Contribution du SIG à l'élaboration d'une méthode d'aide à la gestion des ressources pastorales pour la faune sauvage du Parc national de Nakuru au Kenya

Nicolas GANZIN, Pascal TOUSTOU, GDTA, Ramonville, France.
Jean-Marie FOTSING, Université d'Orléans- IRD,Orléans, France.
Martin MULAMA, Kenya Wildlife Service,Nairobi, Kenya.
E-mail : Nicolas.Ganzin@ifremer.fr

Résumé : Les pâturages des zones arides et semi-arides sont caractérisés par leur vulnérabilité. Du fait de ressources limitées, très variables dans le temps et dans l'espace, liées principalement au climat, leur exploitation peut se traduire par des dégradations irréversibles du potentiel de production, d'où la nécessité d'une gestion durable de ces ressources. Dans ce contexte, les SIG, de par leur capacité d'intégration de données multi-échelles, sont utilisés comme outil de recherche pour la mise au point méthodologique. Ils permettent de s'affranchir des difficultés techniques liées à l'intégration des diverses informations nécessaires, et donc de concentrer le travail d'une part, sur l'identification des données à intégrer : production de biomasse (dérivée de données satellites large champ), types de végétation (avec densité du couvert ligneux), qualité et accessibilité des pâturages, découpages administratifs, statut et type d'exploitation (zone protégée ou non), et d'autre part, de définir et exécuter les traitements d'analyse spatiale nécessaires pour obtenir une information utilisable pour la gestion des ressources. Cette contribution des SIG à l'élaboration d'une méthode d'aide à la gestion des pâturages est illustrée par un cas d'étude réalisé sur le Parc National de Nakuru au Kenya, où des données multiples, une fois identifiées, intégrées et traitées conjointement par analyse spatiale, permettent d'estimer des paramètres essentiels de gestion des pâturages tels que la capacité de charge ou l'intensité de pâture.

Mots clés : Ressources pastorales, SIG, Analyse spatiale, capacité de charge, Kenya

The contribution of GIS to the elaboration of a method to assist forage resources management for wildlife in a small protected area in Kenya

Abstract: Arid and semi-arid rangelands are vulnerable. Due to limited forage resources, very variable in time and space because mainly related to the prevalent climatic conditions, their exploitation can result in irreversible degradations of the natural production potential. Sustainable management of these resources is therefore essential. In this context, GIS, because of its capability of multi-scale data integration, is used as a research tool for methodology implementation. It allows to get over technical difficulties related to the integration of various necessary information types and therefore to concentrate efforts on more essential matters such as (i) the identification of the data

to be integrated : biomass production (derived from low resolution satellite imagery), vegetation types (including density of woody cover), quality and accessibility of the forage, administrative boundaries, status and type of land use (protected or unprotected area), and (ii) the definition and application of the spatial analysis processes required to obtain information suitable for range resources management. The contribution of GIS to the elaboration of a method aiming at assisting rangeland management is illustrated by a case study on the Nakuru National Park in Kenya where multiple data, once identified, integrated and processed jointly by spatial analysis, allows an estimation of some essential parameters of forage resources management, such as the carrying capacity and the grazing/browsing intensity.

Key words: Rangeland resources - GIS, spatial analysis, Carrying capacity, Kenya

Introduction

En milieu tropical, les ressources naturelles sont soumises à des pressions de plus en plus fortes du fait d'une population humaine toujours croissante, accompagnée d'une augmentation des effectifs d'animaux domestiques. Parallèlement, les aires protégées, où les animaux sauvages peuvent vivre dans un environnement relativement préservé, sont de plus en plus réduites et menacées par ces pressions anthropiques. C'est le cas des savanes sèches d'Afrique tropicale en général, qui, considérées comme marginales pour l'agriculture à cause d'un climat aride à semi-aride, sont sujettes à une exploitation d'intensité croissante, malgré leur potentiel de production limité. Or, les ressources majoritairement pastorales sont fragiles du fait même de l'aridité mais aussi de l'irrégularité du climat, notamment des précipitations. Les sécheresses sont récurrentes alors que les besoins des herbivores sont quasi-constants. Il s'ensuit souvent une surexploitation des pâturages qui peut entraîner des dégradations irréversibles à long terme. En effet, le surpâturage tend à provoquer soit une perte de productivité des pâturages, principalement due à l'érosion, soit une perte de leur qualité se traduisant surtout par une modification floristique au détriment des espèces les plus nutritives ou les plus consommées par les herbivores domestiques ou sauvages (Lapeyronie et Le Floc'h, *in* Daget et al., 1995 ; Tainton, 1999).

Dans un souci de conservation des milieux, il est essentiel de gérer au mieux ces ressources fourragères limitées. En d'autres termes, on doit faire en sorte que le niveau d'exploitation des pâturages soit compatible avec les capacités de production et de récupération des végétaux après pâture. Aussi, pour une gestion rationnelle et efficace, il est indispensable de bien connaître à la fois les ressources végétales et les besoins fourragers des herbivores. Mettre ces deux principaux paramètres en correspondance permet de tirer des conclusions sur l'intensité d'exploitation des pâturages, et de prendre des mesures plus rationnelles de gestion. Mais un tel schéma de gestion est un peu simpliste car il dissimule les difficultés de prise en compte des diverses informations de sources très variées, à des échelles différentes et souvent dans des formats différents pour établir l'adéquation entre ressources et besoins. Par exemple, la production des pâturages, en général dérivée de données satellites à large champ, est donnée sous

forme d'images à petite échelle. En revanche, les besoins sont le plus souvent déduits de comptages d'animaux par zones géographiques délimitées par des polygones au format « vecteur » et à grande échelle. *A priori*, la comparaison de telles informations n'est pas aisée. Elles ont heureusement, un important point commun : ce sont des données spatialisées et géo-référencées, donc compatibles avec les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Il devient donc possible de les superposer, s'affranchissant ainsi de problèmes d'échelle et de format, et même d'effectuer divers traitements numériques permettant de les comparer.

L'objectif dans cette communication est de montrer, à travers l'exemple du Parc national de Nakuru au Kenya, comment la puissance d'intégration et de calcul du SIG a permis de s'affranchir des contraintes techniques de manipulation des données pour orienter et approfondir la réflexion sur le choix des données appropriées, sur les types d'intégration, et sur le calcul des indices les plus pertinents pour une meilleure gestion des pâturages laquelle prend en compte l'ensemble des données nécessaires, à la fois environnementales, administratives et socio-économiques. Cette réflexion s'inscrit dans le cadre d'un travail de recherche-développement à l'initiative de la Coopération française au Kenya, en partenariat avec le *Kenya Wildlife Service* (KWS) et avec l'assistance technique du Groupement pour le développement de la télédétection aérospatiale (GDTA). Le projet correspondant vise à mettre à profit les techniques existantes de traitement d'images spatiales et de SIG, pour apporter, de façon opérationnelle, une couche d'information additionnelle sur les ressources fourragères dans les zones protégées du Kenya, permettant ainsi au KWS de mieux gérer les effectifs et mouvements de faune sauvage, et de mieux conserver le patrimoine écologique par une gestion rationnelle et basée sur une information réelle et mise à jour.

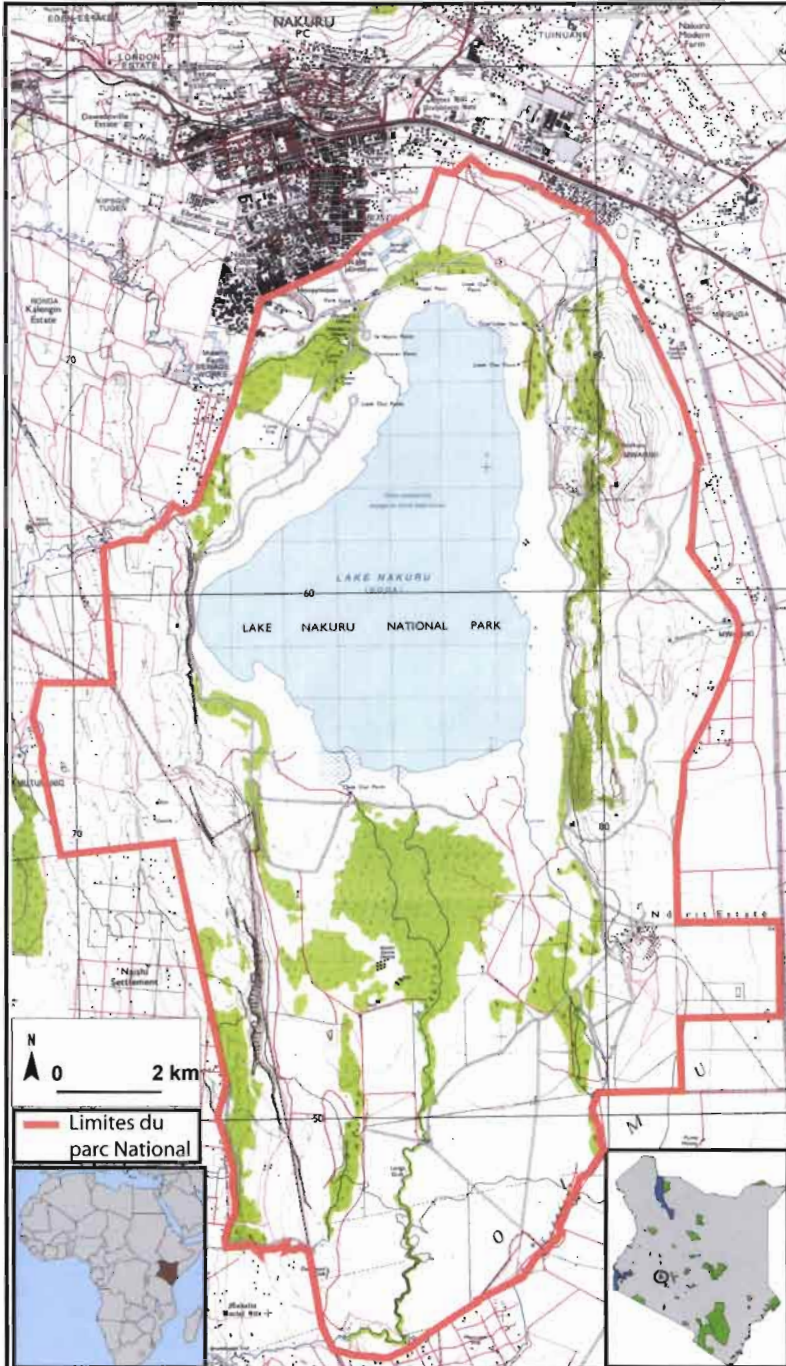
Pour montrer le rôle du SIG dans notre méthode de recherche, nous présentons dans un premier temps la zone d'étude et l'inventaire complet des données disponibles et considérées comme utiles pour caractériser le milieu et son niveau d'exploitation pastorale. Ceci permettra de juger de la diversité des données à analyser, regroupées dans la même base. Ensuite, grâce à l'outil de recherche SIG, nous décrivons en détail les traitements réalisés à la fois sur des images et sur des objets géographiques pour obtenir des produits simples mais riches en informations utiles pour la prise de décision en matière de gestion. Cette présentation de méthodes et des résultats sera suivie d'une discussion et conclusion.

Zone d'étude et inventaire des données utiles

Généralités sur le Parc national de Nakuru

Situé au centre du Kenya, le Parc national de Nakuru est une zone protégée de petite taille créée en 1968. C'est l'un des parcs les plus visités du pays qui génère d'importants revenus pour l'office national responsable de la faune sauvage et des zones protégées, le *Kenya Wildlife Service* (KWS). Outre son intérêt économique, Nakuru est un site écologique unique, avec au total, plus de 450 espèces d'oiseaux et 56 es-

Figure 1 - Situation de la zone d'étude



Source : KWS et Carte IGN Nakuru, 1997

pèces de mammifères répertoriées. La flore du parc est également riche avec environ 550 espèces de plantes différentes identifiées dans les 8 principaux types de formations végétales du parc : les zones marécageuses, les prairies alcalines, les plaines de savanes herbeuses, les plaines de savanes boisées, le taillis de *Tarchonanthus*, la forêt d'Euphorbe, la forêt d'*Olea tecta* et la forêt d'Acacia jaunes (Mulama et Njaga, 1999).

Avec une superficie totale de 188 km² dont 40 sont occupés par le lac (fig. 1), le Parc national de Nakuru représente une surface de pâturages limitée pour une charge animale relativement importante. Les besoins fourragers les plus importants sont dus à la présence d'une population de presque 2 000 buffles, accompagnés de 3 000 à 5 000 impalas et de nombreuses autres espèces d'herbivores (cf. tab. 1). La régulation par prédation est faible du fait du nombre limité de grands fauves (environ 20 lions et 10 léopards ; Mulama et Njaga, 1999). Les éléphants sont, pour leur part, absents de la liste des grands herbivores du parc.

Tableau 1 - Comptages annuels des principales espèces d'herbivores de Nakuru (Source KWS)

Espèces d'herbivores	Poids vif moyen (kg)	1996	1997	1998	1999	2000
Buffle	450	1565	1701	1944	1762	1769
Elan du cap	550	107	70	52	52	62
Girafe	900	76	64	60	74	57
Gazelle de Grant	40	322	218	256	244	312
Impala	40	4579	3701	3025	3094	2979
Gazelle de Thomson	15	664	602	513	611	485
Phacochère	45	2380	1074	728	615	284
Cob Defasa	160	1438	1151	962	950	542
Zèbre	200	557	409	583	634	747

Le parc est entièrement clôturé du fait de la proximité immédiate de zones cultivées et de l'agglomération de Nakuru, 4^e ville du pays qui compte plus de 200 000 habitants au recensement de 2002. Les herbivores du parc ne peuvent donc compter que sur les ressources fourragères à l'intérieur du parc, aucune migration n'étant possible. D'un point de vue agro-climatique, Nakuru est situé dans une zone assez favorable pour la production végétale, avec une pluviométrie moyenne annuelle de 820 mm. Mais les saisons de production sont très différentes les unes des autres du fait de l'irrégularité du climat. Des problèmes de surcharge se posent régulièrement, lors de mauvaises saisons, entraînant des pertes importantes chez les herbivores les plus sensibles. Les effectifs de populations de buffles et de phacochères ont diminué de moitié lors de la période sèche et prolongée de 1999 (Mulama et Njaga, 1999).

Le Parc national de Nakuru offre de nombreux avantages qui en font un site d'étude simple et bien adapté pour notre thématique de recherche. Il s'agit en effet d'un espace sur lequel on dispose d'importants documents écrits et cartographi-

ques. Par ailleurs, en dépit de sa taille réduite, il présente une grande diversité de faciès écologiques allant des forêts aux prairies herbeuses, ce qui peut faciliter la transposition des méthodes et la généralisation des résultats à d'autres écosystèmes. En outre, l'absence d'éléphants, herbivores complexes et la relative simplicité des populations d'herbivores rend plus aisée l'estimation des besoins fourragers des herbivores sauvages. Ces besoins sont encore mal connus et difficiles à évaluer sur la faune sauvage, mais ils sont ici approchés par des méthodes simplifiées développées au départ pour le cheptel domestique. On fait l'hypothèse d'adaptabilité de cette méthode à des populations sauvages dominées par les « paiseurs¹ » comme le buffle et l'impala. Enfin et surtout, il se pose un problème réel de capacité de charge dans le parc de Nakuru, ce qui en fait une zone d'intérêt privilégiée, où les gestionnaires pourront très largement bénéficier d'une information sur l'intensité avec laquelle les ressources sont utilisées.

Inventaire des données utiles à la gestion des ressources pastorales

Pour mettre en relation les ressources fourragères du Parc national de Nakuru avec les besoins des populations d'herbivores, cinq types d'informations principales (soit disponibles, soit acquises pour le projet) ont été mises en oeuvre. Il s'agit de informations géographiques de base, des estimations de production saisonnière de biomasse, des types de couvert végétal, de l'accessibilité et de la qualité des pâturages, et du recensement des herbivores dont on déduit une évaluation des besoins fourragers. Certaines proviennent du traitement d'images satellites, d'autres de la numérisation de cartes, d'autres encore de campagnes de photographies aériennes et d'autres enfin de relevés de terrain. Ces informations synthétiques utiles à la gestion des ressources pastorales sont présentées de façon détaillée dans l'inventaire qui suit.

Information géographique de base

La première information utile est la limite du parc national. Elle correspond à la clôture qui isole le parc et donc à la zone exploitable par les herbivores. La connaissance de ces limites est indispensable à l'analyse spatiale qui consistera, par la suite, à cumuler les ressources, les besoins, ou les effectifs d'animaux sur l'ensemble de la zone d'intérêt pour pouvoir ensuite les comparer. Ces limites ont été numérisées avec précision par le KWS à partir d'une carte au 1/50 000 (fig. 1). L'information est donc disponible sous la forme d'un polygone dont la surface est bien définie et qui couvre 14 775 hectares (superficie en eau du lac non comprise).

Estimations de la production de biomasse

La quantité de fourrage disponible pour répondre aux besoins des herbivores est une donnée indispensable à la caractérisation du niveau d'utilisation des ressources fourragères. Pour l'évaluer, on se base en général sur la production saisonnière de biomasse, qui correspond à la partie des ressources renouvelée saison après saison,

¹ « Paiseurs » : herbivores consommant principalement la strate herbacée, par opposition aux « brouteurs », qui préfèrent les feuilles des arbres et arbustes.

et non à la « biomasse sur pied ». En effet, cette dernière peut être très différente de la production saisonnière dans des écosystèmes aux espèces pérennes dominantes, une partie de la biomasse pouvant provenir de saisons précédentes. C'est le cas à Nakuru, où sont présents par endroits de nombreux arbres et arbustes, mais aussi une composante dominante d'herbacées pérennes (Mulama et Njaga, 1999).

La production fourragère, en climat tropical, est principalement liée aux pluies. Celles-ci, au Kenya, déterminent les saisons de croissance selon un régime annuel bi-modal. L'année est donc scindée en deux saisons de production : la saison des courtes pluies (*short rains*) qui s'étend d'octobre à décembre environ, et la saison des longues pluies (*long rains*) en général incluse dans la période comprise entre avril et juin.

L'évaluation de la production fourragère est possible par mesures de terrain, mais ces mesures sont pénibles et coûteuses, donc difficiles à entreprendre régulièrement à chaque saison, pour prendre en compte la variabilité temporelle. De plus, elles sont échantillonnées et par conséquent prennent mal en compte la variabilité spatiale du climat, donc de la ressource végétale. On peut aussi s'appuyer sur des données météorologiques pour estimer la production végétale, principalement au travers de modèles de bilan hydrique. Toutefois, l'attrait pratique de la méthode n'efface pas l'aspect ponctuel des mesures qui, ici encore, sont peu représentatives dans l'espace.

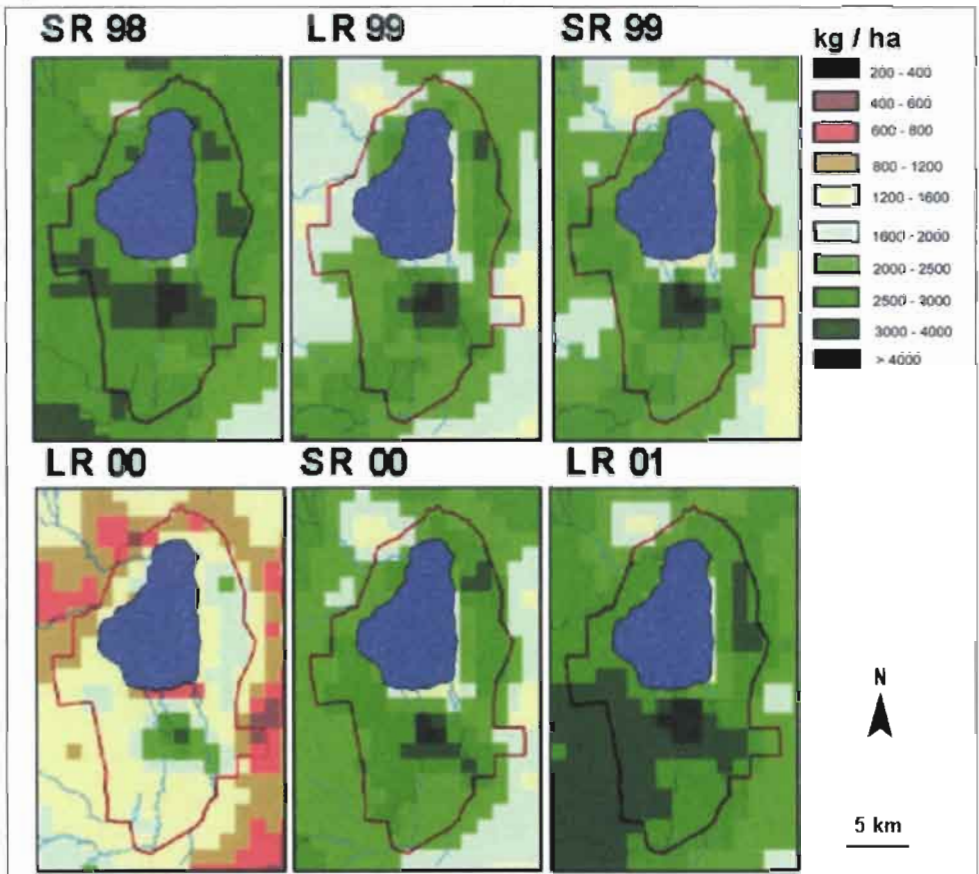
Une alternative efficace pour estimer la production fourragère est l'utilisation de données satellites. On part pour cela du principe que l'activité photosynthétique des plantes, principal facteur de la production végétale, est liée au rayonnement solaire absorbé par les plantes (Bégué, 1993 ; Prince, 1991). À partir de données de télédétection, on peut calculer des indices de végétation, indicateurs de la « verdure » et donc de la capacité des plantes à intercepter et absorber ce rayonnement pour la photosynthèse. Ceux-ci peuvent ainsi être utilisés comme la principale donnée d'entrée de modèles de production simulant la photosynthèse comme le modèle de Monteith (Kumar et Monteith, 1981 ; Prince, 1991 ; Ruimy et al., 1994 ; Nouvellon et al., 2000). Appliqués sur l'ensemble d'une saison de croissance, ces modèles prennent en compte à la fois l'intensité de la verdure et la durée de la période d'activité végétale pour calculer une estimation quantitative de la production végétale.

Pour obtenir des images d'indice de végétation appropriées, on utilise des données satellites provenant de capteurs à large champ et à basse résolution spatiale (Hobbs, 1995, Prince and Tucker, 1986). Les systèmes de ce type les plus courants tels que NOAA/AVHRR, SPOT/VEGETATION, SEAWIFS, MODIS, MERIS, ont en général une résolution de l'ordre du kilomètre, avec parfois des possibilités de résolutions plus fines pouvant aller jusqu'à 250 m. Leur très bonne résolution temporelle assure une régularité dans la fourniture des données indispensable au suivi d'un phénomène aussi dynamique que le développement saisonnier de l'activité végétale. Bien que les images soient disponibles quasiment tous les jours, les indices de végétation ne le sont le plus souvent que tous les 10 jours sous forme de synthèses décadaires, la synthèse permettant de s'affranchir d'une partie des problèmes liés à l'enneigement et aux distorsions diverses (Holben, 1986).

Des données satellites NOAA/AVHRR et SPOT/VEGETATION sur l'ensemble du Kenya, sont disponibles sous forme d'indices de végétation décadaires, couvrant la pé-

riode entre 1992 et la date présente². Des estimations de production de biomasse ont ainsi pu être calculées sur l'ensemble de la saison de croissance végétative qui, dans le cas de Nakuru, peut être considérée comme s'étalant sur les 6 mois qui encadrent la saison théorique des pluies : février à juillet pour les « *long rains* », et août à janvier pour les *short rains*. La figure 2 présente les résultats d'estimations de production de biomasse (en kg de matière sèche par hectare) par le modèle de Monteith pour six saisons à partir d'images SPOT4/VEGETATION. La comparaison de ces saisons fait clairement apparaître l'extrême variabilité de la production d'une saison à l'autre. On comprend aisément l'intérêt de disposer à la fois d'une couverture totale de l'espace et d'une régularité d'acquisition des données, d'où le recours aux données spatiales fournies par les satellites à large champ.

Figure 2 - Production de biomasse estimée pour 6 saisons



Données satellites de base : SPOT4/VEGETATION – Résolution : 991,8 m (à l'équateur)

Projection : Géographique (Lat-Lon)

SR = Courtes Pluies (*Short Rains*) – LR = Longues Pluies (*Long Rains*).

² Seules les données VEGETATION entre 1998 et 2001 sont utilisées dans ce travail.

L'information obtenue sur la production fourragère se présente sous la forme d'images, c'est à dire de grilles de pixels géo-référencés. Cette information est donc compatible avec la zone d'intérêt qui correspond aux limites du parc telles que matérialisées sur la figure 2.

Cartographie actualisée de la végétation

La production de biomasse est étroitement associée aux types de végétation présents sur les espaces considérés. La productivité des espèces ligneuses (végétaux à bois possédant un tronc et/ou des branches) donc arbres ou arbustes, est en général reconnue comme étant inférieure à celle des espèces herbacées (Ruimy et al., 1994 ; Nouvellon et al., 2000). Pour estimer la production de biomasse de façon fiable à partir des données de télédétection, il faut donc prendre en compte la proportion des ligneux dans le couvert végétal. Pour cela, il est indispensable de cartographier avec précision la végétation de l'ensemble de la zone du parc de Nakuru, d'autant plus que celui-ci est constitué de couverts très diversifiés. La carte actualisée de la végétation (fig. 3) a été obtenue par classification supervisée d'une image SPOT XS à haute résolution spatiale (20 m), acquise le 7 février 1999 (Toustou, 2002).

Les huit types de formations végétales identifiées y sont délimités avec précision et répartis sous la forme d'une couverture géographique constituée de polygones. Chaque type correspond à une association différente d'espèces, mais aussi à une structure différente c'est-à-dire associant une proportion variable des strates herbacée, arborée et arbustive.

Les paramètres de structure, accessibilité, et qualité des pâturages

Les estimations de production de biomasse, présentées au paragraphe précédent comme étant les indicateurs des ressources fourragères ne sont que des estimations « brutes » qui reflètent de façon imprécise le potentiel réel du pâturage. En effet, elles ne prennent pas en compte le fait que :

- les arbres et arbustes sont moins productifs que les plantes herbacées ;
- la biomasse produite n'est pas forcément accessible aux animaux ni appréciée par eux.

Les estimations « brutes » sont en fait calculées comme si le couvert était entièrement herbacé, totalement accessible, et apprécié à 100 % par les herbivores sauvages. En végétation herbacée pure et de très bonne qualité fourragère, ces valeurs brutes sont acceptables. En milieu plus complexe, on s'attend à ce que la production soit en revanche surestimée, parfois très largement. Quoiqu'il en soit, le potentiel d'un pâturage pour la production animale est déterminé par le fourrage réellement disponible et doit s'appuyer sur des estimations de production réalistes, donc corrigées, surtout dans des milieux à structure végétale complexe comme à Nakuru.

La correction de la production est possible si l'on connaît les valeurs de chacun des trois paramètres responsables de la surestimation potentielle : la proportion de couvert ligneux, l'accessibilité (limitée principalement par la densité des maquis et la hauteur des arbres) et l'appétibilité (*palatability*), qui est une évaluation de la qualité d'un pâturage. Celle-ci est en grande partie déterminée par la composition floristique, fondée à la fois sur l'attrait des animaux pour le fourrage, la digestibilité du fourrage, et sa valeur nutritive. Des processus de traitement d'images simples permettent de

Figure 3 - Végétation du Parc National de Nakuru (Classification d'image SPOT haute résolution)



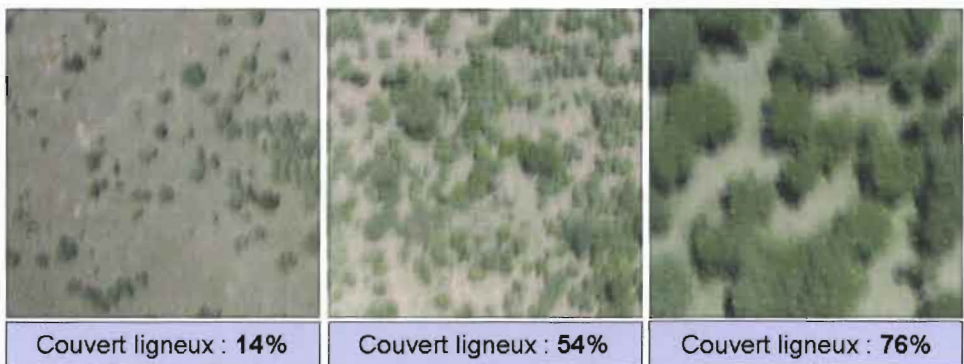
Source : Image SPOT XS du 07/02/1999

1 : Forêt d'Acacia - 2 : Prairie alcaline - 3 : Sol nu - 4 : Forêt d'Euphorbe - 5 : Marécages
- 6 : Forêt d'Olea Tectlea - 7 : Prairie - 8 : Taillis de Tarchonantus - 9 : Prairie arborée - 10 :
Eau - 11 : Cours d'eau - 12 : Routes et chemins - 13 : Limites du parc national

réajuster les valeurs d'estimations de production de biomasse en fonction de chacun de ces trois paramètres pour lesquels des données ont été recueillies et intégrées sous forme de 3 nouveaux attributs dans la carte de la végétation, et ce pour chacun des 8 types de couvert.

La densité du couvert ligneux a été évaluée par photo-interprétation de photographies aériennes verticales prises lors de la campagne de survol de Nakuru du 8 avril 2002. Une soixantaine de clichés ont été pris le long de transects réguliers, à une hauteur de 300 m, prédéfinis sur carte pour couvrir tous les types de couvert identifiés à Nakuru. Ils ont permis de déterminer la proportion du couvert ligneux (en %) par comptage suivant une grille de 100 points superposée aux épreuves numériques (fig. 4). Les paramètres d'accessibilité et d'appétibilité, également exprimés en pourcentage, ont pour leur part été évalués sur le terrain par estimation visuelle avec l'aide d'écologues du KWS (*Kenya Wildlife Service*) et du DRERS (*Department of Resource Surveys and Remote Sensing*) spécialistes des pâturages.

Figure 4 - Estimation du couvert ligneux sur photographies aériennes



Source : Mission aérienne du 8 avril 2002 (hauteur approximative 300 m).

Recensement des animaux et évaluation des besoins fourragers

Afin de juger de l'intensité d'exploitation des ressources fourragères du parc, il est nécessaire de posséder une estimation des besoins de l'ensemble des herbivores, valeur que l'on peut alors comparer à la production. Le tableau 1 (cf. première partie), présente les résultats de comptages totaux des grands herbivores sauvages dans le parc de Nakuru pour quelques années. Il mentionne également le poids vif moyen par espèce. C'est sur la base de ces deux informations que l'on peut estimer les besoins totaux en biomasse fourragère. Une méthode simple, développée pour le bétail, consiste à admettre que les animaux ont besoin de consommer, en matière sèche, 2,5 % de leur poids vif par jour comme ration d'entretien pour un pâturage naturel de qualité moyenne³. Les saisons étant de 6 mois (180 jours environ), les effectifs et le poids vif

³ En réalité, les besoins ramenés au kilogramme de poids vif varient avec la masse corporelle. Les petits herbivores ont des besoins supérieurs à ceux des gros du fait d'un métabolisme plus important (voir par exemple Owen-Smith, 1982). Nous faisons abstraction de ces principes par souci de simplification.

étant connus, on peut cumuler les besoins de toutes les espèces pour l'ensemble du parc et pour une saison donnée.

Gardons toutefois à l'esprit que les animaux sauvages vivant en conditions de ressources limitées ont des comportements alimentaires complexes, très différents de ceux des herbivores domestiques. Leurs besoins fourragers sont encore assez mal connus. Cette estimation simple des besoins reste donc assez grossière, mais nous la considérons comme acceptable pour ce qui est du Parc national de Nakuru. En effet, en l'absence d'éléphants, les espèces ayant les plus gros besoins fourragers ont des régimes alimentaires relativement simples dont on fera l'hypothèse qu'ils sont proches de ceux du bétail, rendant ainsi la méthode d'évaluation des besoins applicable.

Traitement et intégration des données par analyse spatiale

Disposant désormais de toutes les données nécessaires, le SIG nous donne la possibilité de les intégrer dans un même environnement et d'effectuer les calculs qui permettront de comparer efficacement la production de biomasse aux besoins des animaux sur l'ensemble du parc. Au-delà des simples opérations successives de calcul, les étapes qui suivent mettent en évidence la place centrale et le rôle incontournable du SIG dans le déroulement de cette recherche. En effet, pour cet outil, nous faisons à la fois appel à la puissance d'intégration et aux multiples capacités d'analyse spatiale des SIG.

Conversion de données et génération des masques de correction

La première étape de manipulation des données de base sur les ressources fourragères consiste à les corriger successivement des effets du couvert ligneux, de l'accessibilité, et de l'appétibilité. Cette étape relève à la fois de l'analyse spatiale (par les SIG) et du traitement d'images du fait des données de format différent auxquelles on fait appel : des images satellites au format *raster* pour les estimations de production de biomasse, et une carte au format vecteur contenant l'information de base pour les corrections.

Pour pouvoir lancer le processus de correction et l'appliquer aux images de production de biomasse, on doit donc au préalable connaître la valeur de chacun des trois paramètres de correction. Cette valeur est contenue dans les attributs de la carte de végétation mise à jour, mais elle doit être accessible pour chaque pixel de l'image de production de biomasse en cours de correction. Il est donc nécessaire de réaliser une conversion de la carte de végétation du format vecteur au format *raster*, générant ainsi 3 masques. Ceux-ci consistent en des images synthétiques dont les comptes numériques sont les valeurs de chacun des 3 paramètres de correction, à la résolution des images satellites de départ et qui leur sont superposables pixel à pixel. Cette opération peut apparaître compliquée à mettre en œuvre mais dans la pratique devient assez simple avec les SIG. Les masques résultant de ces conversions appliquées sur l'extrait de Nakuru sont présentés sur la figure 5.

Figure 5 - Masques issus de la conversion vecteur-raster

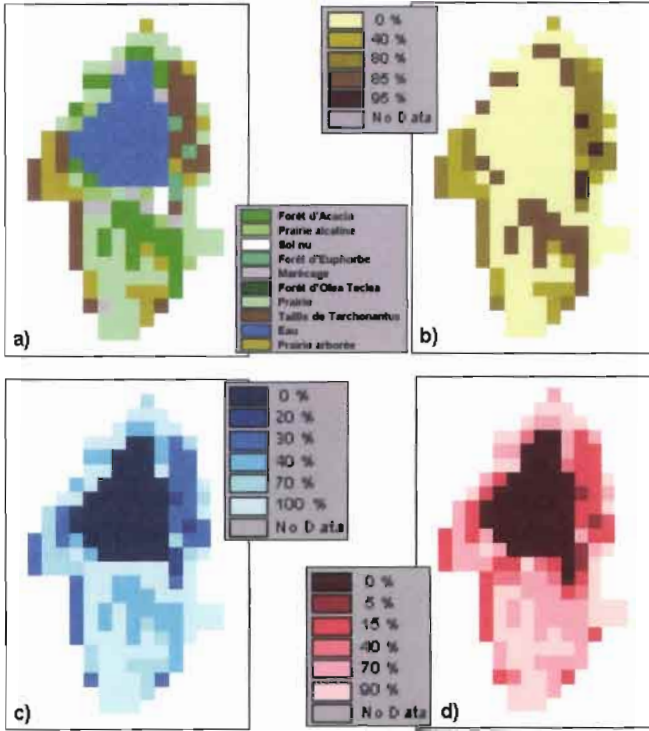
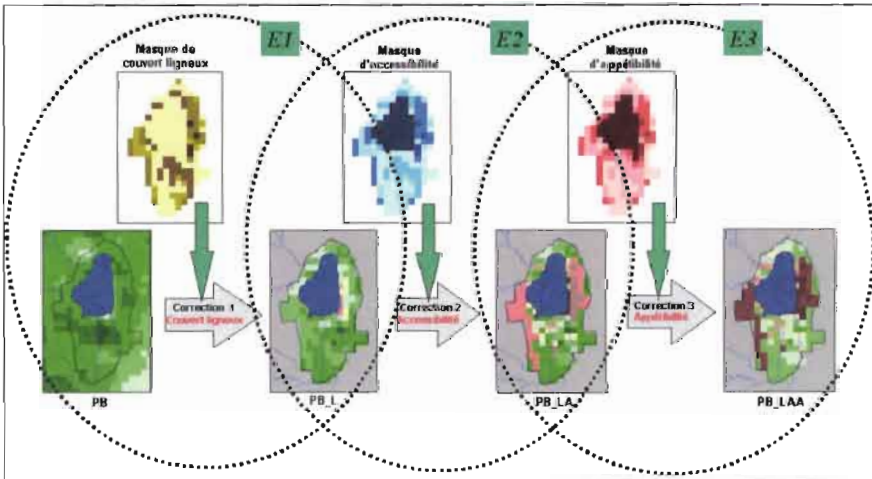


Figure 6 - Correction des estimations de production de biomasse

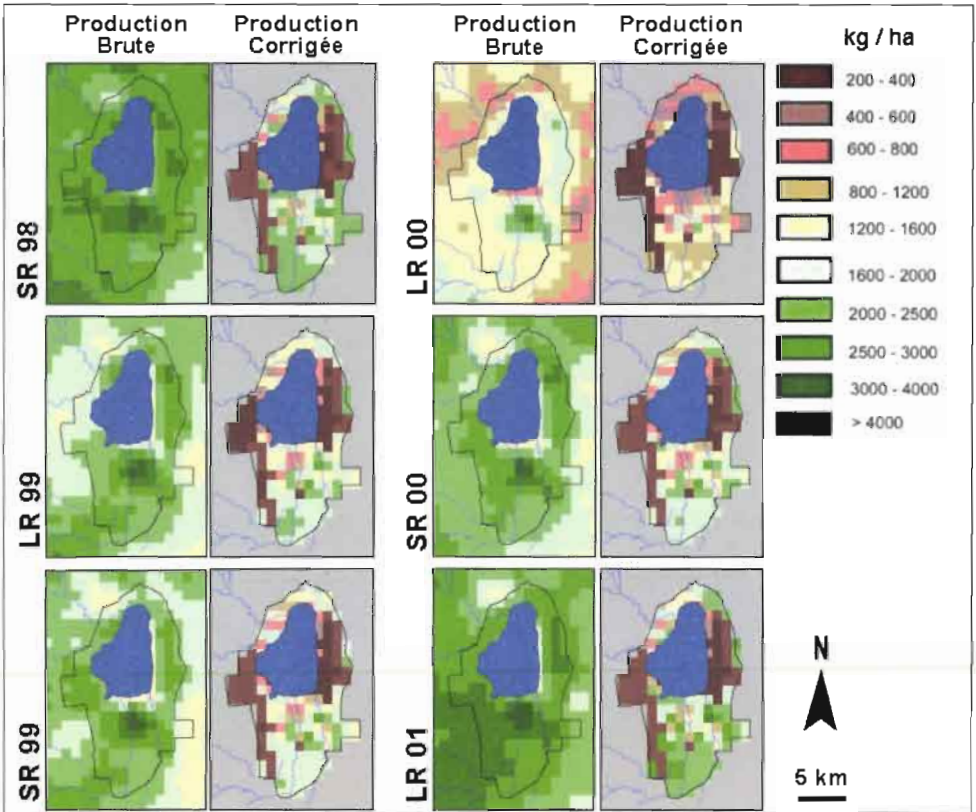


E1, E2, E3 : Étapes de correction ; PB : Production saisonnière de biomasse ; PB_L : Production corrigée de l'effet des ligneux ; PB_LA : Production corrigée de l'effet des ligneux et de l'accessibilité ; PB_LAA : Production corrigée de l'effet des ligneux, de l'accessibilité, et de l'appétibilité.

Correction des estimations de production de biomasse

La correction proprement dite est une opération relativement simple en matière de traitement d'images. On applique les proportions lues successivement dans les trois masques, pixel à pixel, pour ramener les valeurs de production saisonnière de biomasse à des niveaux plus réalistes et proches des quantités de fourrage réellement disponibles pour les animaux. La figure 6 explicite les étapes successives des corrections et leurs effets sur l'exemple de la production de biomasse d'une saison récente traitée à partir d'images VEGETATION.

Figure 7 - Exemples de résultats corrigés



La figure 7 montre pour sa part l'effet de la correction sur 6 saisons de production de biomasse, suggérant une réduction substantielle de la production de biomasse disponible par rapport à la production brute, comme nous allons le voir dans la suite.

Intégration spatiale sur l'ensemble du parc

Grâce aux comptages totaux et à la méthode d'estimation des besoins individuels des animaux, nous disposons d'une estimation des besoins fourragers pour l'ensemble des herbivores du parc et pour chaque saison pour laquelle les données de biomasse

produite sont disponibles. En revanche, il nous faut encore intégrer la production de biomasse sur le parc pour pouvoir la comparer à ces besoins. Cette opération d'analyse spatiale est encore une fois rendue possible et facilitée par les SIG. En effet, les pixels contenus dans le polygone qui délimite le parc peuvent facilement être identifiés et pris en compte pour effectuer des calculs tels que la moyenne de la production de biomasse sur l'ensemble du parc.

Cette moyenne permet d'ailleurs d'évaluer l'impact du procédé de correction des valeurs du disponible fourrager décrit au paragraphe précédent. On peut en effet, tous types de végétation confondus, comparer la quantité de fourrage théoriquement disponible, en moyenne et par unité de surface, et ce après chaque correction. Les résultats sont consignés dans le tableau 2 pour chacune des 6 saisons prises en compte pour l'étude. On constate que les corrections sont loin d'avoir un effet négligeable sur le parc de Nakuru car la production réellement disponible est environ trois fois inférieure à la production brute.

Tableau 2 - Effet des trois corrections consécutives sur la production de biomasse moyenne (kg/ha)

	SR 98	LR 99	SR 99	LR 00	SR 00	LR 01
PB « brute »	2 187	1 751	1 727	1 047	1 848	2 164
PB corrigée	1 809	1 440	1 409	848	1 515	1 779
Différence (%)	- 31,0	- 31,0	- 30,8	- 31,6	- 30,7	- 31,2
PB accessible	1 073	881	874	496	914	1 127
Différence (%)	- 59,1	- 57,8	- 57,1	- 60,0	- 58,2	- 56,4
PB appétibilité	740	608	604	339	634	776
Différence (%)	- 66,2	- 65,3	- 65,0	- 67,6	- 65,7	- 64,2

PB = Production de Biomasse, SR = Courtes Pluies (Short Rains), LR = Longues Pluies (Long Rains).

La moyenne de production est également utile si l'on veut évaluer la capacité de charge (ou capacité d'accueil de charge) qui est l'un des paramètres du pastoralisme les plus classiques (Daget et al., 1995). La capacité de charge se définit comme le nombre d'animaux (ou unités équivalentes) que l'on peut placer par unité de surface pour une exploitation durable du pâturage. Elle dépend directement de la production de biomasse, mais aussi des besoins des animaux qui, comme nous l'avons vu, sont complexes et assez difficiles à évaluer.

Si, on applique la méthode simplifiée des 2,5 % du poids vif par jour pour l'évaluation des besoins, on peut calculer une capacité de charge brute⁴ approximative pour chaque saison (tab. 3). On peut même calculer une moyenne inter-saisonnière

⁴ La capacité de charge « brute » est ici prise au sens de biomasse animale que le milieu pourrait supporter si l'on considérait que toute la biomasse végétale produite peut être consommée par ceux-ci, ce qui laisserait le sol sans protection et vulnérable à l'érosion.

qui pourra être un indicateur général prenant en compte de façon très simplifiée la variabilité temporelle.

Tableau 3 - Capacités de charge moyennes (kg de poids vif par hectare) sur l'ensemble du parc pour 6 saisons et moyenne inter-saisonnière

	SR 98	LR 99	SR 99	LR 00	SR 00	LR 01	Moyenne 6 saisons
CC (kg/ha)	165	135	135	75	140	172	138

CC = Capacité de charge, SR = Courtes Pluies (*Short Rains*), LR = Longues Pluies (*Long Rains*)

La valeur intégrée la plus utile reste toutefois la somme (total) de la production pour l'ensemble du parc, directement comparable aux besoins pour la même zone. Ce calcul plus complexe que la moyenne, effectue la somme, pixel après pixel, des valeurs correspondant à la production. Il fait ainsi intervenir la surface de chaque pixel (en hectares) et donc prend en compte la résolution spatiale des images utilisées.

Estimation de l'intensité de pâture

L'intensité de pâture est un paramètre de comparaison directe entre l'offre (production de biomasse) et la demande (besoins fourragers). Elle est calculée, pour l'ensemble d'une zone bien définie, de la façon suivante :

$$IP (\%) = \frac{\text{Besoins des populations d'herbivores}}{\text{Fourrage disponible total}} \times 100$$

Si l'intensité de pâture est supérieure à 100%, les besoins sont supérieurs à la production et les ressources pastorales sont insuffisantes pour la saison concernée. On peut aussi définir le « taux de satisfaction des besoins » (TS) qui est le quotient inverse de l'intensité de pâture et prend une valeur inférieure à 100% quand les ressources sont déficitaires. L'intensité de pâture et le taux de satisfaction peuvent être calculés pour diverses saisons à partir des estimations des ressources par satellite intégrées sur le parc et des besoins dérivés de comptages totaux.

À des fins de démonstration, nous allons nous intéresser plus particulièrement à deux saisons parmi celles à notre disposition : une bonne saison de production, les courtes pluies de 1998, et une mauvaise saison (sécheresse), les longues pluies de 2000. Le tableau 4 présente l'ensemble des résultats de comparaison des besoins et des ressources pour ces deux saisons considérées comme couvrant une période de 6 mois.

Les données du tableau montrent que pour la bonne saison de production (SR 98), l'intensité de pâture (47%) est nettement plus faible que pour la mauvaise saison (LR 00 : 94%). Pour cette dernière, les besoins (5 970 tonnes de matière sèche) correspondent approximativement aux ressources (6 386 tonnes), ce qui est théoriquement un signe de sur-exploitation. En effet, les gestionnaires de pâturages essaient toujours d'éviter la consommation de la totalité des ressources pour prévenir ainsi les dégradations qui s'ensuivent.

Tableau 4 - Estimation globale des besoins fourragers et calcul de l'intensité de pâture pour deux saisons (*Short Rains* 1998 et *long rains* 2000)

Espèce d'herbivore	Poids vif moyen (kg)	Effectifs 1998	Besoins Saison SR98 (kg)	Effectifs 2000	Besoins Saison LR00 (kg)
Buffle	450	1944	3 936 600	1769	3 582 225
Elan du cap	550	52	128 700	62	153 450
Girafe	900	60	243 000	57	230 850
Gazelle Grant	40	256	46 080	312	56 160
Impala	40	3025	544 500	2979	536 220
Gazelle Thomson	15	513	34 628	485	32 738
Phacochère	45	728	147 420	284	57 510
Cob Defasa	160	962	692 640	542	390 240
Rhinocéros noir	2 500	0	0	23	258 750
Rhinocéros blanc	2 500	23	258 750	23	258 750
Zèbre	200	583	524 700	747	672 300
Total besoins (6 mois, kg de matière sèche)			6 557 018		6 229 193
Total production fourrage (kg)			13 927 221		6 386 332
Intensité de Pâture			47 %		97 %

SR = Courtes pluies (*Short Rains*), LR = Longues pluies (*Long Rains*)

Discussion et conclusion

Discussion et limite des résultats

L'intégration et les calculs divers d'analyse spatiale nous ont permis d'évaluer d'une part les besoins fourragers et d'autre part les ressources afin d'aboutir à des résultats concrets de caractérisation de l'utilisation des pâturages dans le Parc de Nakuru. Nous allons à présent tenter d'illustrer les résultats obtenus grâce à la puissance des SIG à livrer une information riche mais suffisamment simple pour orienter efficacement la prise de décision, et ce à partir de données pourtant extrêmement diverses au départ.

Les résultats obtenus montrent comment, à partir d'une valeur unique telle que l'intensité de pâture, on manipule une information très riche directement applicable sur le terrain. En poursuivant le raisonnement sur l'exemple du parc de Nakuru et des deux saisons choisies, on pourra conclure très simplement que le parc est surchargé, sachant que pour une gestion durable, les gestionnaires recommandent le plus souvent d'éviter une consommation supérieure à 50 % des ressources disponibles. On constate en effet que, pour une bonne année, le niveau de consommation est déjà pratiquement à son maximum théorique avec une intensité de pâture de 47 %, et ce sans prendre en compte la consommation des petits herbivores et des insectes. Une réduction des effectifs s'impose donc, et la connaissance du niveau actuel d'exploitation, illustrée

des multiples exemples pris parmi les différentes saisons suivies, suggère avec quelle intensité cette réduction d'effectifs doit être appliquée.

Toutefois, la richesse et la simplicité du résultat ne doivent pas masquer le fait que les principales données sur les besoins et les ressources sont et demeurent des estimations. En ce qui concerne les besoins, rappelons que les comptages, même s'il s'agit des effectifs globaux, ne sont jamais tout à fait exacts. Gardons surtout à l'esprit que les besoins journaliers des herbivores sont eux aussi approximatifs surtout dans le cas des animaux sauvages dont on connaît mal les comportements dans ce domaine. Pour ce qui est des ressources, malgré les énormes avantages de la télédétection en termes de couverture totale et de régularité d'acquisition dans le temps, les résultats restent également approximatifs. Même si les modèles de production ont montré leur bien fondé grâce à des études de terrain, ils restent sensibles et dépendants de la qualité des images satellites elles-mêmes.

Quoi qu'il en soit, il est possible d'améliorer nettement la fiabilité de ces données grâce à la puissance d'intégration et de calcul des SIG. La correction des estimations de production en fonction d'une information sous jacente sur le type de végétation le montre bien : sans atteindre la perfection, on arrive malgré tout à des valeurs beaucoup plus proches de la réalité et à partir desquelles on peut évaluer l'intensité d'exploitation des ressources. Il s'agit là, à l'heure actuelle, de la source de données la plus pratique et la plus fiable, malgré ses limites.

Conclusion

L'étude de cas abordée dans cette communication montre bien comment on peut, grâce aux Systèmes d'information géographique, élaborer une information riche en intégrant des données très diverses, *a priori* incompatibles, et que l'on n'aurait pas forcément eu l'idée d'associer. On a pu, grâce à cette approche intégrée, aller beaucoup plus loin dans le traitement de ces données que par une analyse individuelle de chacune d'entre elles, et obtenir ainsi des produits qui se résument à quelques chiffres. C'est le cas par exemple du taux de satisfaction des besoins (ou intensité de pâture), qui concentre une grande quantité d'information et dont l'interprétation est facile aussi bien par les scientifiques que par les décideurs en matière de gestion. Au plan méthodologique, les SIG ont permis d'élaborer un cheminement simple pour caractériser plus efficacement des situations réelles sur le terrain, donner la meilleure représentation spatiale, et tirer des conclusions sur l'utilisation des ressources. En disposant de données d'archive, on peut aussi prendre en compte dans le raisonnement une importante variabilité temporelle liée au climat et permettant de comparer des situations différentes. Certes, une situation de surpâturage peut très bien être identifiée sans l'aide du SIG. Par contre, l'étendue spatiale du problème, l'identification des zones les plus touchées, où l'intensité du surpâturage, sont beaucoup plus difficiles à appréhender. C'est à ce niveau d'analyse que les SIG sont d'une grande utilité : ils permettent d'évaluer la gravité du problème, information indispensable pour une prise de décision efficace, tenant compte de la réalité de la situation dans son ensemble, seul moyen d'appliquer une gestion rationnelle et durable.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement la Coopération française, qui a financé le projet, et les collègues kenyans du KWS et du DRSRS impliqués et dont l'expérience de terrain a permis d'obtenir des données indispensables.

Références bibliographiques

- BEGUE A., 1993 : Leaf Area Index, Intercepted Photosynthetically Active Radiation, and Spectral Vegetation Indices : a sensitivity analysis for regular clumped canopies. *Remote Sensing of Environment*, 46, 45-59.
- DAGET Ph. et GODRON M., 1995: Pastoralisme. Troupeaux, espaces et sociétés. Editions Hatier – AUPELF – UREF. 475 p.
- HOBBS T.J., 1995: The Use of NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of central Australia, *International Journal of Remote Sensing*, 16(7), 1289-1302
- HOLBEN B.N., 1986 : Characteristics of Maximum Value Composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11) : 1417-1434.
- KUMAR M. and MONTEITH J.L., 1981: Remote Sensing of crop growth. In *Plants and the daylight spectrum*, edited by H. Smith, (London, Academic Press), p.131-144.
- MULAMA M. and NJAGA D., 1999: Lake Nakuru National Park – Ecological Monitoring Report 1998, Kenya Wildlife Service, Nairobi, Kenya. 55 p.
- NOUVELLON Y., LO SEEN D., RAMBAL S., BEGUE A., MORAN S., KERR Y., and QI J., 2000: Time course of radiation use efficiency in a shortgrass ecosystem: consequences for remotely sensed estimation of primary production. *Remote Sensing of Environment*, 71, 43-55.
- OWEN-SMITH N., 1982 : Factors influencing the consumption of plant products by large herbivores. In : HUNTLEY B.J. and WALKER B.H. (Eds): *Ecology of tropical Savannas*, 359-404. Springer Verlag, Berlin. 660 p.
- PRINCE S.D., 1991 : A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 12 (6) : 1301-1311.
- PRINCE S.D. and TUCKER C.J., 1986 : Satellite Remote Sensing of rangelands in Botswana. II. NOAA AVHRR and herbaceous vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11) : 1555-1570.
- RUIMY A., SAUGIER B., DEDIEU G., 1994 : Methodology for the estimation of terrestrial net primary biomass production from remotely sensed data, *J. Geophysical Research*, 99 (3) 5263-5283.
- TAINTON N.M., 1999 : Veld Management in South Africa, University of Natal Press. 472 p.
- TOUSTOU P., 2002 : Evaluation de la production fourragère dans les zones protégées du Kenya par Télédétection à large champ : Amélioration de la précision des produits par prise en compte des caractéristiques du couvert végétal dans un environnement SIG. *Rapport de DESS CETEL, GDTA, Toulouse*, 70 p.

Application du SIG en climatologie locale : exemples sur les remblais des lignes à grande vitesse (TGV)

Sébastien BRIDIER, Université de Provence, France

Hervé QUÉNOL, Université de Rennes 2, France

Gérard BELTRANDO, Université Denis Diderot, Paris, France

E-mail : sebastien.bridier@univ-lyon2.fr

Résumé : La superposition, dans un SIG, de fichiers en mode vecteur et raster est utilisée pour évaluer, à différentes échelles spatiales fines, l'influence d'un remblai ferroviaire (nouvelles lignes à grande vitesse) sur deux types de variables du système climatique :

- les écoulements d'air froid et le gel printanier dommageable pour les bourgeons dans le vignoble de Champagne ;
- la modification de l'écoulement du mistral à proximité du remblai (accentuation des turbulences) pouvant altérer la qualité des fruits.

Les documents cartographiques qui résultent de cette modélisation spatiale sont des outils d'aide à la négociation d'aménagements spécifiques ou de mesures compensatoires entre le maître d'ouvrage et les agriculteurs concernés.

Mots clés : SIG, climatologie locale, remblai

GIS Application in local climatology : examples on the railway embankments (TGV)

Abstract: *The overlay of vector and raster format files in a GIS is used to evaluate, in various fine scales, the influence of a railway embankment on two types of variables of the climatic system :*

- cold air flows and spring freezing in the Champagne vineyard;*
- modification in the mistral wind flow near the embankment (turbulences) which can deteriorate the quality of fruits.*

The cartographic documents resulting from this spatial modelling are tools to assist the negotiation of specific installations or compensatory measures between the builder and the concerned farmers.

Key words: *GIS, fine scales climatology, risk, embankment*

Introduction

Certains phénomènes météorologiques se produisent dans des espaces relativement restreints et engendrent un risque pour les individus ou leurs activités économiques (inondation, pollution urbaine, brouillard, gelée...). Pour le gel radiatif (ciel clair, vent faible ou nul), la topographie, les aspérités et la nature de la surface sont autant

d'éléments du milieu susceptibles de modifier les écoulements d'air froid superficiel et donc de contribuer à l'explication de la variabilité spatiale des plus basses températures (Marht, 1986 ; Carrega, 1994). L'apport d'un nouvel obstacle à l'écoulement de l'air froid, tel que l'implantation d'un remblai ferroviaire, peut perturber ces écoulements et accentuer le risque de gel dommageable pour les cultures fruitières notamment au printemps après le débourrement des bourgeons (entre avril et fin mai), période où ceux-ci peuvent être détruits (en dessous de -2°C). Pour les vents forts, le remblai constitue un obstacle imperméable qui crée des turbulences supplémentaires pouvant altérer la qualité de la production fruitière.

Pour évaluer l'impact des modifications de la surface sur le climat local et réaliser une cartographie du risque supplémentaire imputable à un remblai (gel, turbulences), une méthodologie adaptée aux échelles spatiales fines est nécessaire. Après avoir acquis, ponctuellement, des données sur le terrain par l'intermédiaire de mesures météorologiques, une modélisation spatiale sur l'ensemble de l'espace étudié permet de représenter les aires concernées par ce phénomène. La principale difficulté d'une telle modélisation spatiale réside dans l'influence des paramètres locaux (topographie, environnement...) sachant qu'ils agissent sur les variables météorologiques à différentes échelles spatiales imbriquées. Les méthodes géostatistiques utilisées couramment pour l'interpolation des données météorologiques issues des réseaux climatologiques classiques sont bien sûr inadaptées à ce type de problématique. Il convient donc d'utiliser une méthode de cartographie permettant d'établir les relations entre les caractéristiques de surface (morphologie, occupation du sol) et les variables météorologiques. L'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) est un moyen approprié pour ce type de modélisation spatiale.

Méthode

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique combinant plusieurs formats de données (vectorielle et raster) permet de mettre en relation les données mesurées ponctuellement sur le site d'étude (température, force et vitesse des brises thermiques...) avec les différents obstacles (relief, occupation du sol, haies brise-vent...) qui influent sur la variabilité spatiale des paramètres météorologiques (Feyt et al, 1995). Certaines informations nécessitent des traitements de données préalables (réalisation d'un Modèle Numérique de Terrain), le SIG se compose de plusieurs logiciels (Mapinfo et Surfer) et d'une passerelle informatique qui assure une liaison entre ces logiciels qui ont des fonctions spécifiques. Après divers traitements informatiques et statistiques, l'ensemble des informations, qui sont de formats (raster et vecteur) et d'échelles différents, est intégré dans le logiciel vectoriel (Mapinfo) sous la forme de couches qui, une fois superposées, permettent d'obtenir une représentation spatiale des phénomènes météorologiques étudiés et une cartographie exhaustive des secteurs à risques climatiques. Les cartes finales sont en mode vectoriel afin d'obtenir la précision nécessaire à ce niveau d'échelle.

Ici, le SIG n'est pas considéré comme un logiciel unique mais comme un ensemble de logiciels qu'il faut mettre en relation. « L'intérêt de ces différents outils est qu'ils ne sont pas conçus séparément pour répondre à un problème précis. L'utilisateur doit développer sa propre démarche, ses modèles. Le problème est ensuite technique : comment passer d'un outil à un autre. C'est la différence entre les SIG développés dans une finalité précise et les SIG généralistes » (Sanders et al., 1994). La mise en œuvre de ces diverses méthodes de spatialisation demande, au niveau informatique, la réalisation d'une passerelle entre les logiciels et les formats.

Cette passerelle, appelée matrice vectorielle (Bridier et al, 2000), permet de mettre en relation les logiciels Mapinfo et Surfer. La matrice est composée d'un ensemble d'objets vectoriels carrés qui forment une grille continue dans l'espace de travail. Cette grille constitue une image raster dont les pixels ont des propriétés d'objets vectoriels, d'où le nom (certes ambigu) de matrice vectorielle. À chaque carré de la matrice peuvent être associés plusieurs attributs (altitude, pente, température...). Par exemple, les informations liées à l'altitude, à l'orientation de la pente ou aux paramètres météorologiques, dissociées lors des différents traitements, deviennent les attributs d'un même objet. La résolution spatiale de la matrice permet d'afficher les données avec une précision similaire de l'image raster issue de l'interpolation dans le logiciel Surfer. Cette matrice permet donc ensuite de mettre en relation les informations, d'origine raster (MNT, pente, champ de températures...) avec les données vectorielles (occupation du sol).

Les exemples présentés ici sont des applications de cette méthode qui combinent les deux formats de données ainsi que la construction d'objets vectoriels permettant de représenter des secteurs à risques avec une bonne précision. Ces applications abordent des études de climatologie appliquées en milieu rural.

Applications en milieu rural

Les deux applications présentées abordent l'impact d'obstacle linéaire en remblai sur le climat local. L'objectif de ces études est de réaliser une cartographie de la surface agricole où le risque climatique (gel de printemps et vent fort) est accentué par l'implantation des ouvrages ferroviaires.

Pour ces deux exemples, l'occupation du sol est représentée à partir de supports graphiques et numériques (cartes IGN, cadastre, photographie aérienne orthorectifiée, plan 1/1 000 des tracés LGV, BD topo...) et à partir d'observations sur le terrain (une observation sur le terrain permet d'apporter ou de préciser une information à chaque objet géographique). Par exemple, en milieu rural, chaque parcelle agricole est assimilée à un fichier numérique comprenant le type de culture (espèce, variété, âge), la taille des parcelles, les caractéristiques des haies brise-vent (nature, hauteur, perméabilité et homogénéité). Les informations utilisées pour la réalisation des Modèles Numériques de Terrain (altitude, pente, exposition, zone de convergence et de divergence) sont issues des données radar Visual Dem et de données altimétriques mesurées par des géomètres et fournies par Réseau Ferré de France.

Modélisation spatiale de l'accentuation du risque gélif imputable à la future LGV Est européenne

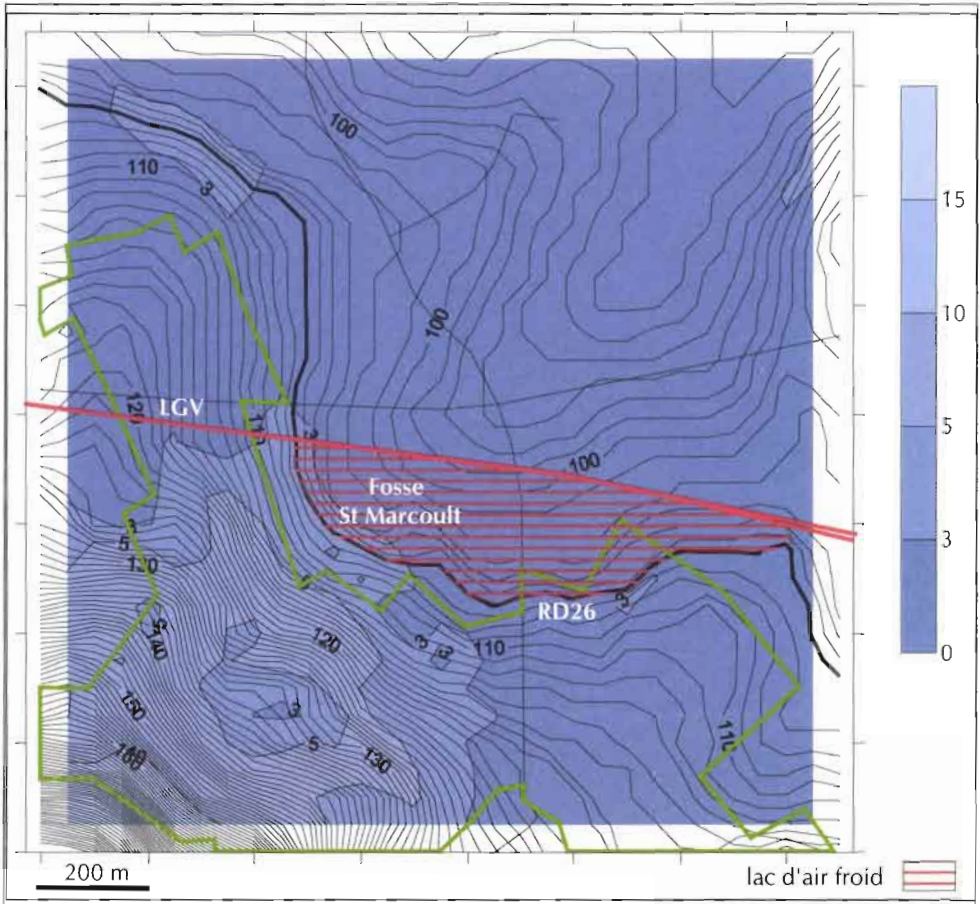
Dans le département de la Marne, la Ligne à grande vitesse (LGV) Est européenne traversera le vignoble AOC de Champagne en contrebas des coteaux de la Montagne de Reims. La nuit, en situation radiative (ciel clair ou peu nuageux, vents faibles ou nuls), dans les secteurs en remblai, l'ouvrage ferroviaire constituera un obstacle à l'air froid qui actuellement s'écoule naturellement, suivant les lignes de pente, vers les parties les plus basses de la plaine (hors du vignoble). Au printemps, l'accumulation de l'air froid en amont du remblai pourra générer un risque supplémentaire de gel pour les vignes qui sont particulièrement vulnérables aux basses températures au moment du débourrement des bourgeons.

Des mesures de températures et d'écoulements de l'air froid ont mis en évidence une amplitude thermique atteignant 4-5° C entre le secteur le plus haut, avec la pente la plus forte (plus chaud), et la partie basse où l'air froid s'accumule. La répétition des mesures (8 nuits de mesures) a montré que la masse d'air la plus froide n'affecte pas le vignoble. Mais, la présence future du remblai ferroviaire de 6 m de hauteur surmonté de murs antibruit et d'un remblai routier permettant le passage d'une route départementale au-dessus de la Ligne à grande vitesse (LGV), vont tout naturellement créer un barrage aux écoulements de pente et créer un lac d'air froid qui s'étendra en amont de l'ouvrage ferroviaire jusqu'au vignoble.

Après avoir représenté l'occupation du sol (vignoble, réseau routier, remblai ferroviaire...), les données liées à l'altimétrie (altitude, pente, direction théorique des écoulements nocturnes) ont été calculées et intégrées dans le SIG par l'intermédiaire de la matrice composée ici d'un pixel de 50 m de côté. Connaissant la topographie de l'espace étudié, ainsi que la hauteur des obstacles, la surface du futur lac d'air froid, supposée horizontale (dans un premier temps) puis en fonction de la direction du vent, est calculée par l'intermédiaire d'une requête dans Mapinfo.

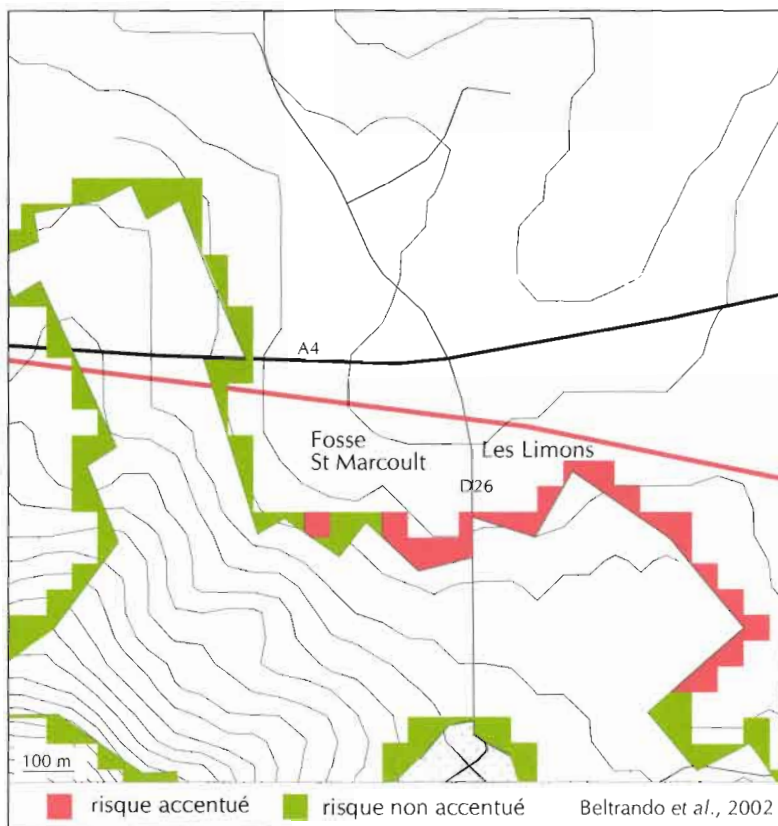
Une première estimation de la surface du lac d'air froid dans la Fosse St Marcoult après l'implantation de la LGV a été réalisée. En considérant que l'ouvrage est de 6 m de haut dans le fond du secteur (100 m), et qu'il est horizontal, la hauteur du barrage correspond à 106 m d'altitude (courbe de niveau surlignée en noir plus épais sur la figure 1). La première approximation du lac d'air froid correspond donc au secteur hachuré. La première approximation du lac d'air froid recouvre le vignoble à l'ouest de la départementale, mais il reste éloigné du vignoble à l'est de cette route. Cependant, un vent de vitesse faible, d'échelle régionale ou synoptique, peut déplacer l'air froid du lac sur les pentes faibles sans déstructurer la stratification thermique des premiers mètres de cet air (Cellier, 1989 ; Bridier, 2001 ; Quénot, 2002) : lors d'une précédente étude climatique (toujours dans le vignoble champenois), nous avons observé qu'un vent faible, autour de 1 à 2 m.s⁻² (au-delà le mélange est plus important et la stratification froide disparaît) pouvait déplacer la masse d'air froid lorsque la pente était inférieure à 3° (Beltrando et al, 2002).

Figure 1 - Simulation du lac d'air froid sur le site de Vrigny après l'implantation du remblai ferroviaire de la LGV



En effectuant une requête pour chaque «carré vectoriel» combinant une pente inférieure à 3° , la présence du vignoble et la direction du vent, une cartographie de l'extension théorique du lac d'air froid a été réalisée. Par exemple, par vent de secteur nord, l'air froid stocké par le barrage atteint le secteur viticole situé de part et d'autre de la départementale. Les travaux antérieurs ont montré que le lac d'air froid ne remonte pas sur plus de quelques mètres de haut (la stratification a une pente d'environ 3°), mais dans un milieu où la topographie est faible cela peut correspondre horizontalement à plusieurs dizaines de mètres. À l'est de la RD26, la pente étant assez faible, l'air froid peut s'étendre sur quelques centaines de mètres le long du coteau. Pour les secteurs du vignoble où les pentes sont plus élevées ($>3^\circ$) il y a moins de risque de progression du lac d'air froid. En intégrant le vecteur «vent de nord» aux secteurs où la pente est inférieure à 3° , nous estimons que le vignoble potentiellement soumis à risque supplémentaire de gel est d'environ 11 ha (avec une résolution de $\frac{1}{4}$ ha) (fig 2).

Figure 2 - Surface du vignoble où le risque gélif estimé est accentué par la LGV avec un vent de nord



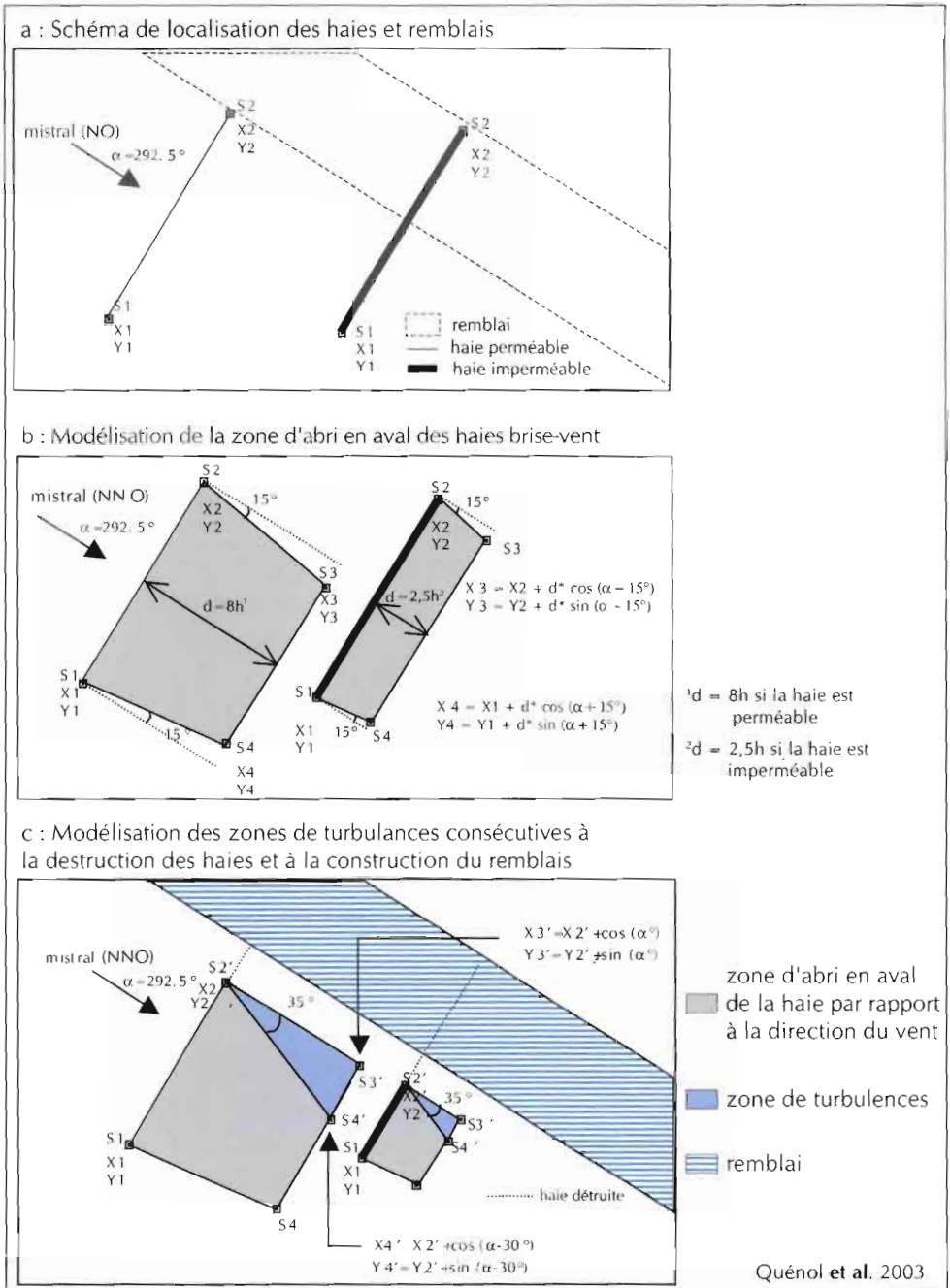
Pixel de 50 m de coté (Beltrando et al, 2002).

Les résultats de cette étude ont servi de document de base au maître d'œuvre (Réseau Ferré de France et les bureaux d'étude associés) afin de définir des modifications dans le tracé limitant le risque gélif (construction d'ouvertures dans le remblai permettant une évacuation de l'air froid). Dans cet exemple, l'utilisation du SIG composé du module vectoriel et du module matriciel par l'intermédiaire de la passerelle informatique a permis d'estimer le risque gélif engendré par un ouvrage linéaire en remblai.

Modélisation spatiale des zones d'abri en aval des haies brise-vent et du risque lié aux effets mécaniques du mistral aux abords de la LGV Méditerranéenne

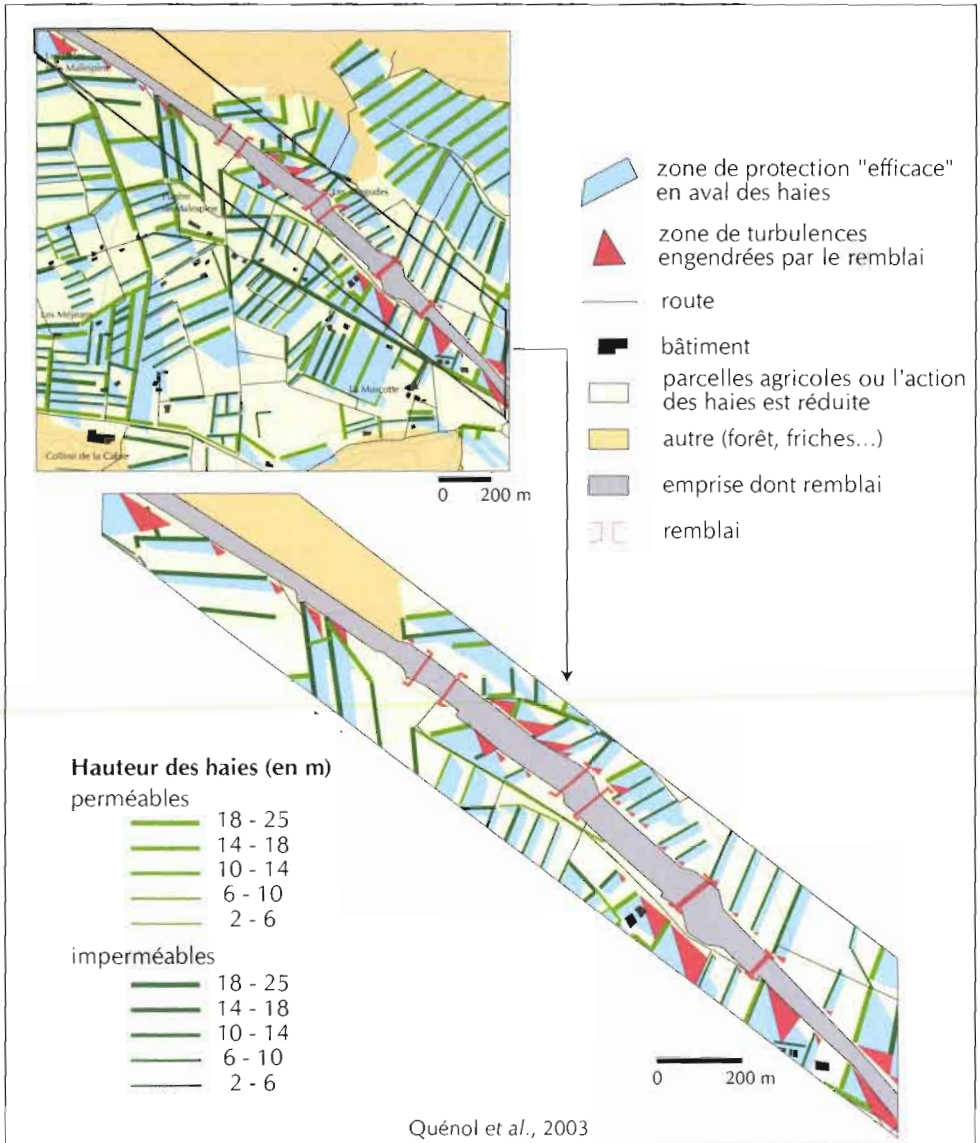
La LGV Méditerranéenne (Valence-Marseille) traverse les terrains agricoles (maraîchage, arboriculture) des communes de Mallemort et Senas dans la basse vallée de la Durance au sud de Cavaillon. L'implantation des infrastructures ferroviaires a nécessité l'arrachage des arbres dans un couloir pouvant atteindre 100 m de large (35 m + 4 fois la hauteur de l'ouvrage) et la construction d'un remblai atteignant 15 m de haut à

Figure 3 - Modélisation du mistral aux abords des haies brise-vent avant et après l'implantation du remblai ferroviaire



l'est de la zone d'étude. Cet aménagement modifie l'équilibre climatique généré par le réseau de haies brise-vent, en particulier par temps de mistral. À proximité de la ligne ferroviaire, le resserrement entre les haies (plus ou moins imperméables) et le remblai engendrent une accélération de la vitesse du vent (quasi parallèle à la LGV). Par ailleurs, ils provoquent une déviation vers la parcelle en aval de la haie pouvant engendrer des dégâts qualitatifs sur les fruits (coups, frottement contre les branches...).

Figure 4 - Modélisation spatiale des secteurs agricoles où l'écoulement du mistral est modifié par les haies brise-vent et les infrastructures de la LGV



Des mesures aérologiques (vitesses et direction du vent) ont permis d'une part, d'estimer la surface parcellaire protégée en aval d'une haie brise-vent (celle-ci variant suivant la porosité et la hauteur de la haie) et d'autre part, d'évaluer l'impact de la LGV sur l'écoulement du mistral. Dans cette étude, la modélisation du vent ne nécessite pas de traitements raster. La modélisation spatiale des zones d'abri en aval des haies et des zones de turbulences à proximité de la LGV est réalisée à partir d'objets vectoriels construits en fonction des caractéristiques des haies (perméabilité, hauteur), du remblai et de la direction du vent.

Pour délimiter la surface d'abri en aval de chaque haie, une méthode consistant à combiner des calculs vectoriels est utilisée (fig. 3). Les zones de protection déterminées de façon empirique suivant la porosité et la hauteur des haies sont calculées en fonction de la position de la haie par rapport à la direction du vent (dans ce secteur entre Luberon et Alpilles le vent est de direction nord-ouest) ce qui correspond à $292,5^\circ$. Disposant de la position géographique des haies brise-vent, la surface de protection en aval de la haie peut-être construite en projetant, sur une distance correspondant aux résultats des mesures météorologiques (distance représentant 8 fois la hauteur de la haie si celle-ci est perméable et 2,5 fois si elle est imperméable) le vecteur mistral (avec un angle de plus ou moins 15°) à partir des extrémités de la haie. La zone d'abri est représentée par un trapèze¹ dont la base correspond à la haie.

La modélisation spatiale des portions d'espaces agricoles où le risque anémométrique est accentué par le remblai de la LGV est réalisée suivant le même principe. En fonction du vecteur vent et de l'extrémité de la haie proche du remblai, un triangle empirique de 35° (déterminé par les mesures) est modélisé pour l'ensemble des parcelles arboricoles bordant le remblai. Dans le SIG, la superposition de la couche représentant les zones triangulaires (turbulences) avec la zone de protection en aval de chaque haie, permet de définir une surface d'environ 12 ha où le risque de dégâts supplémentaires pour les cultures fruitières est accentué par les infrastructures ferroviaires (fig 4).

Conclusion

L'utilisation d'un SIG gérant les formats raster et vectoriel a permis de répondre à des problématiques de climatologie appliquée aux échelles fines et de fournir aux professionnels agricoles (Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, Syndicat des vignerons champenois) ou au maître d'ouvrage (Réseau ferré de France), des cartes relativement précises des secteurs agricoles où des dommages pourraient être accentués par l'implantation des remblais ferroviaires. Ces documents cartographiques permettent au maître d'ouvrage de fixer les dernières modifications à apporter à l'ouvrage nécessaires pour limiter le risque climatique lié à l'obstacle anthropique (ex : création d'ouverture dans le remblai de la LGV-Est). Ils permettent également aux profes-

¹ En dehors de cette surface parcellaire, le vent est turbulent et présente un risque pour la qualité des fruits. Aux extrémités de la haie, le vent est dévié vers la parcelle, cela expliquant l'angle de plus ou moins 15° des côtés du trapèze.

sionnels agricoles de disposer d'un document afin d'appuyer d'éventuelles demandes d'aménagement ou d'indemnités compensatoires (installation d'un équipement de lutte antigel...).

Cette méthode est également appliquée à des problématiques de climatologie urbaine notamment dans une étude sur la modélisation spatiale de la pollution de proximité dans les rues de Paris. En intégrant dans le SIG, la topographie, l'occupation du sol (hauteur des bâtiments, largeur des rues, espaces verts...), le niveau de circulation, les données de polluants (mesures du CO₂) et les données météorologiques, l'objectif est de réaliser la modélisation spatiale des secteurs les plus exposés à la pollution de proximité (aux échelles fines) en fonction de ces divers paramètres.

Bibliographie

- BELTRANDO G., BRIDIER S., et QUENOL H., 2002 : *Évaluation de l'impact du futur remblai de la Ligne à grande vitesse Est européenne sur les gelées de printemps dans les vignobles de Vrigny et des Mesneux (Champagne)*. Rapport d'étude pour le Groupement ISL, Réseau ferré de France (RFF) et le Syndicat général des vignerons de la Champagne, 24 p.
- BELTRANDO G., BRIDIER S., MADELIN M. et QUENOL H., 2002 : *Évaluation de l'impact d'un futur remblai de la Ligne à grande vitesse Est européenne sur le risque de gel dans le vignoble de Champagne*. *Hommes et Terres du Nord*, 1, p. 40-52.
- BRIDIER S., 2001 : *Modélisation de la répartition des brises et des températures en situation radiative*. Thèse de doctorat de l'université Denis Diderot (Paris 7), 178 p.
- BRIDIER S., QUENOL H. et BELTRANDO G., 2000 : *Évaluation du risque supplémentaire de gel imputable au talus de la ligne nouvelle du TGV Méditerranée dans la basse vallée de la Durance*. *Photo-interprétation*, 38, p. 17-24.
- CARREGA P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat*. *Revue d'Analyse spatiale quantitative et appliquée*, Th. Et., 35 & 36, 408 p.
- CELLIER P., 1989 : *Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps*. *Le Gel en Agriculture INRA*, p. 145-164.
- FEYT G., MAILLOUX H. et DE SAINTIGNON MF., 1995 : *SIG et information climatique*. *Revue internationale de géomatique*, vol 5, n°3/4, p. 361-376.
- MAHRT L., 1986 : *Nocturnal topoclimatology*. WMO, 117, TD 132, Genève, Suisse, 76 p.
- QUENOL H., 2002 : *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Thèse de doctorat de l'université Lille 1, 259 p.
- QUENOL H., BRIDIER S. et BELTRANDO G., 2003 : *Le TGV et le mistral dans les espaces arboricoles : cartographie des perturbations du vent par un remblai*. *Mappemonde*, 71, p.31-37.
- SANDERS L., RUAS A., DUMOLARD P. et GUARNIERI F., 1994 : *Compte rendu de l'atelier « SIG et autres outils »*. *Colloque Géopoint SIG, Analyse spatiale et aménagement*, Avignon, p. 207-210.

Les SIG dans les sciences humaines et sociales

Utilisation des SIG en archéologie : application à la topographie historique en Indre-et-Loire (France)

Henri GALINIÉ, Anne MOREAU, Xavier RODIER, Elisabeth ZADORA-RIO,
Université de Tours, France
E-mail : galinie@univ-tours.fr

Résumé : Appliquée à des échelles de temps et d'espace variées, la recherche archéologique sur une ville, des paysages ou des ressorts administratifs demande la définition d'éléments constitutifs de la topographie adaptés à la prise en compte de la longue durée. Ces éléments, qui répondent à des principes généraux garantissant leur comparabilité, doivent être ajustables en précision selon les situations locales et les multiples sources pour alimenter une réflexion sur la dynamique spatiale. Un apport notable des SIG concerne leur double capacité dans l'étude de phénomènes de longue durée : ils permettent l'intégration de sources diverses en même temps qu'ils soulignent les effets de sources spécifiques qui accentuent artificiellement les différences. Les exemples présentés concernent la croissance urbaine et la morphologie de Tours, les paysages, la constitution de ressorts administratifs, l'évaluation de l'information.

Mots clés : archéologie urbaine, archéologie du paysage, analyse spatiale, SIG

Use of the GIS in Archeology: Application to historical topography in the Indre-et-Loire (France)

Abstract: *Whether applied to towns, landscapes or territories, at different scales of time and space, archaeological research needs to be based on constitutive topographical elements allowing comparisons in the long time. Constitutive topographical elements must be comparable, and their level of precision must be adapted to the study area; they must allow the simultaneous use of different sources in order to enable spatial analysis. GIS have proved to be useful in two ways in the study of diachronic phenomena: they facilitate the integration of elements coming from various sources (archaeological, architectural, environmental, historical...) and they stress the bias of each source. The paper is based on examples regarding the urban growth of the city of Tours, landscapes, and territories in the Touraine region.*

Key words : *urban archaeology, landscape archaeology, spatial analysis, GIS.*

Introduction

Depuis quelques années, les membres du laboratoire d'Archéologie et territoires (UMR 6675) qui travaillent sur les relations qu'entretenaient des sociétés pré-industrielles avec l'espace se sont attachés à élaborer des systèmes d'information leur permettant de partager des données et de comparer les résultats de leurs travaux à partir

de logiciels du commerce (4D, MapInfo puis ArcGIS). L'objet principal est de fournir une base solide aux recherches historiques sur les dynamiques spatiales. De la sorte, le système d'information doit être applicable :

- à des sociétés pré-industrielles étudiées dans la longue durée (de la préhistoire récente au XIX^e s.),
- à diverses échelles locales (villes, communes, ensembles de communes),
- en milieu urbain et rural (essentiellement en Loire Moyenne).

La mise en place de ce système d'information a nécessité :

- l'adoption de principes communs d'analyse, applicables à tous les lieux étudiés,
- la délimitation de types d'organisation de l'information selon l'objet, l'échelle et les sources,
- le développement d'applications spécifiques adaptées à des lieux et à des programmes.

On se réfère ainsi à trois niveaux, celui des principes partagés (SyAnS), celui des milieux urbain (SyAnUr) et rural (SyAnEP), celui des applications à diverses échelles comme Tours (ToToPI pour 120 ha), trois communes du Bouchardais (TopoTIC pour 2 300 ha), le réseau des paroisses et communes d'Indre-et-Loire (PaCT pour 612 700 ha)¹.

La présente contribution a pour objet de préciser les modalités de formalisation des données hétérogènes livrées par les multiples sources disponibles lorsque l'objectif retenu est d'étudier les dynamiques spatiales dans la longue durée. Si des principes de base peuvent être partagés, l'étude spécifique de milieux urbains et ruraux pré-industriels nécessite la définition d'éléments constitutifs de l'espace considérés à des échelles distinctes imposées par la documentation. Ainsi, seront abordées les relations entre topographie historique et formalisation des éléments constitutifs pertinents de cette topographie, puis successivement les problèmes distincts que pose, en matière d'échelles spatiales et temporelles, l'étude du milieu urbain et du milieu rural pré-industriels, à partir de cas concrets.

Principes généraux

Dans la longue durée, l'approche spatiale d'un ensemble quelconque (ville, territoire) est fondée sur la connaissance préalable des éléments jugés utiles de la topographie et de leurs relations, des origines de l'établissement à l'époque subcontemporaine. L'information disponible concernant ces éléments, toujours lacunaire et hétérogène, doit être organisée de manière à permettre l'établissement d'autant d'états des lieux que nécessaires ou réalisables. Ce sont ces états des lieux chronologiques ou thématiques qui servent de documentation raisonnée aux études que l'on souhaite conduire, en topographie ou en morphologie.

Lorsque le travail porte sur les changements intervenus au cours d'une durée au moins bimillénaire, la difficulté réside en ce qu'il faut procéder par une série d'états successifs.

¹ SYAnS pour Système d'analyse spatiale, SYAnUr pour Système d'analyse urbaine, SyAnEP pour Système d'analyse de l'environnement et des paysages, ToToPI pour Topographie de Tours pré-industriel, TopoTIC pour Topographie de Tavant, L'Île-Bouchard et Cruzilles, PaCt pour Paroisses et communes de Touraine.

L'étude des dynamiques se heurte en permanence au double écueil des restitutions statiques et des documentations lacunaires et surtout hétérogènes au cours du temps. L'hétérogénéité des données est proportionnelle à la durée et à l'étendue considérées.

Le recours à des systèmes d'information présente deux avantages pour pallier ces inconvénients. Un système d'information géographique et les bases de données qui le sous-tendent sont susceptibles d'engendrer une meilleure évaluation de la documentation et de meilleures conditions de comparaison des informations. Dans la longue durée, ce préalable est déterminant, tant les effets de source sont contraignants. Pour tirer partie de ces avantages potentiels, il est indispensable que le système d'information réponde à deux pré-requis :

- être fondé sur l'unité documentaire jugée pertinente en regard des objectifs poursuivis, toutes périodes confondues ;
- permettre une critique interne permanente de chacune des sources mises en oeuvre pour documenter les éléments matériels qui constituent, à diverses échelles, l'aire géographique à étudier.

Éléments de la topographie historique

Dans un contexte culturel connu, toute zone est susceptible de révéler des réalisations typées. Ce sont les éléments de la topographie. On considère donc, comme unité documentaire, toute réalisation ou tout élément naturel modifié ou non présent au sol à un moment donné et participant du paysage. C'est, par exemple, une habitation, un atelier, une ferme, un temple, une église, un château, une halle, un hôtel de ville, un quai, un rempart, une route, une rue, un pont, un gué, une abbaye, un lotissement, mais aussi un verger, un champ, un bois, une carrière, une rivière, un relief...

Un paysage gallo-romain comportera des réalisations typées comme des *villae*, des aqueducs, etc, alors qu'un paysage médiéval comportera des châteaux, des églises, des fermes etc, qui constituent autant de référentiels de topographie historique reconnus par les archéologues et les historiens.

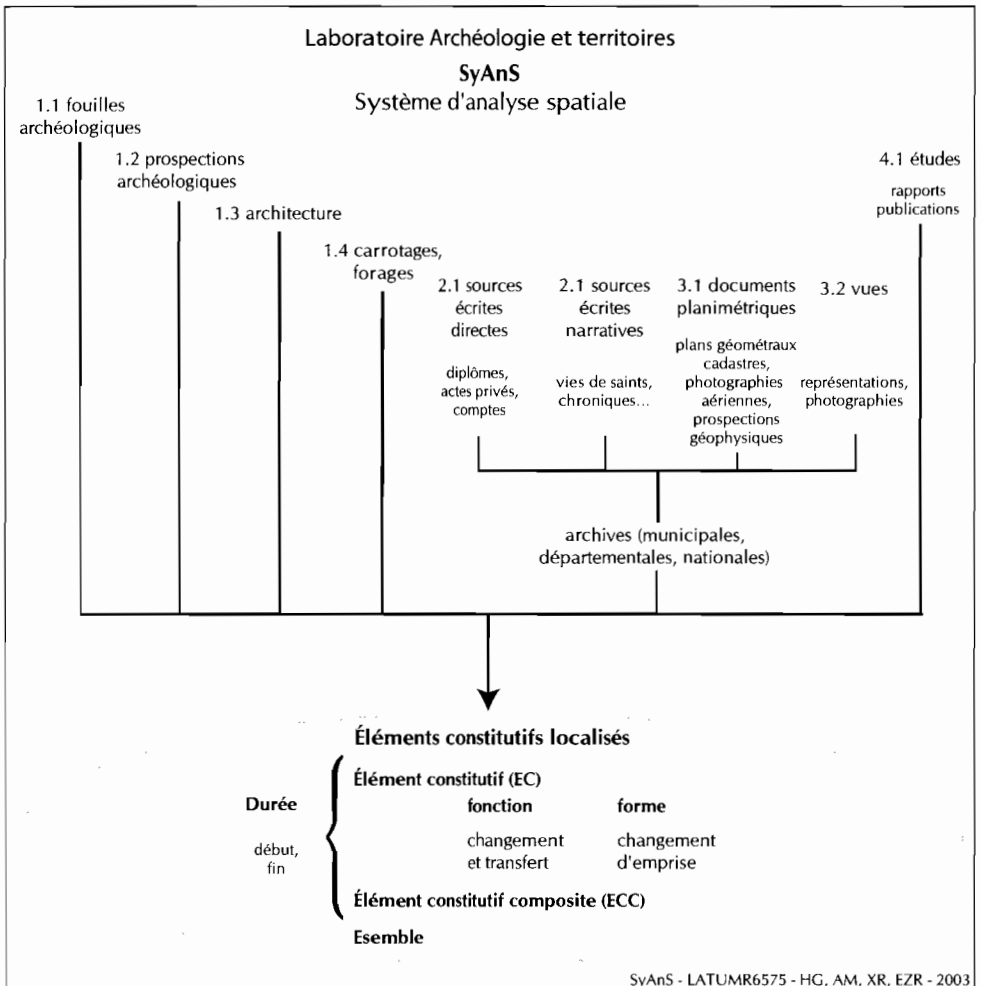
Plusieurs remarques préliminaires doivent être rappelées :

- Toute réalisation dispose d'une histoire propre. Elle est conçue pour un usage, utilisée, parfois réutilisée, parfois réaffectée à des usages successifs différents, donc modifiée, puis conservée comme monument ou détruite (Schiffer, 1987). Elle passe donc, dans la topographie, par plusieurs phases : apparition, usage(s), maintien ou disparition.
- Les éléments de la topographie ont une taille variable, de la maison individuelle au lotissement, au quartier de culture ou au relief. Il n'existe donc pas d'unité de base autre qu'élaborée, à valeur documentaire.
- Le paysage est toujours composite, formé d'éléments d'époques variées. Les éléments les plus récents y sont les mieux représentés en nombre.
- La connaissance que l'on a des éléments est proportionnelle à l'augmentation des sources. Les éléments récents sont généralement plus précisément documentés que les anciens.
- La documentation est lacunaire et surtout hétérogène d'une période à une autre. Les sources disponibles varient de nature et l'examen du degré de comparabilité des éléments renseignés est un préalable.

- Dans la perspective retenue, le lieu est considéré comme un support neutre sur lequel les réalisations et les éléments naturels modifiés ou non, qui sont l'objet de l'analyse, prennent place. Sont privilégiées la détermination de la valeur d'usage puis de la valeur urbaine-agraire-territoriale ou autre selon l'étude de chaque élément. Le rôle ou les rôles tenus à l'échelle pertinente, et la capacité des éléments à être intégrés à des ensembles spatiaux complexes, forment les critères de sélection.

Dans le domaine de la topographie étudiée dans la longue durée, les renseignements utiles ont trois origines : les éléments matériels eux-mêmes, les mentions écrites qui les renseignent, l'iconographie qui les représente. C'est dans ces sources que se trouvent inégalement répartis les éléments constitutifs de la topographie (fig. 1).

Figure 1 - Les sources potentielles et l'élément constitutif

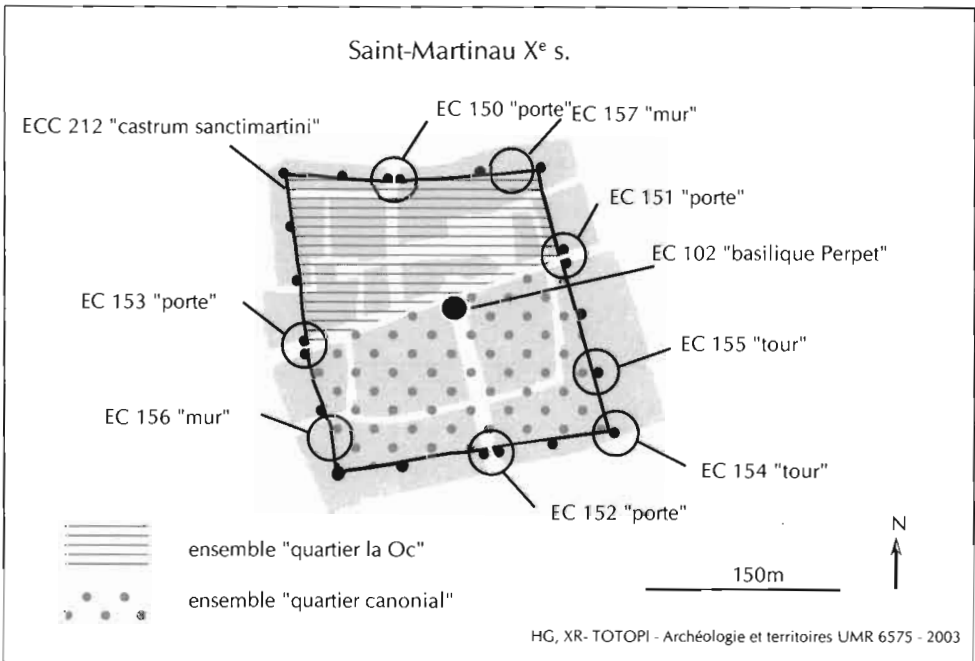


La notion d'élément constitutif

Selon la nature des recherches conduites, il convient de définir ce que l'on considère comme élément constitutif (EC) de la topographie. Si l'élément topographique est virtuellement présent (la *villa* dans le paysage rural antique, les thermes en ville, etc.), la présence des éléments constitutifs doit être attestée dans une ou plusieurs sources.

L'absence d'étalon de mesure engendre la nécessité d'une définition préalable minimale de l'élément constitutif propre à une étude. Quand l'objectif fixé est l'explication de la transformation de l'espace dans la longue durée, ce sont les éléments individuels utiles à la connaissance du fonctionnement des sociétés qui sont considérés comme l'unité de base. L'interprétation fonctionnelle des réalisations ou des usages du sol prévaudra sur les caractéristiques architecturales (les thermes et non les thermes de tel type, la voie de tel à tel endroit et non la voie pavée), la nécropole et non le type de tombe, le verger et non l'arbre etc.

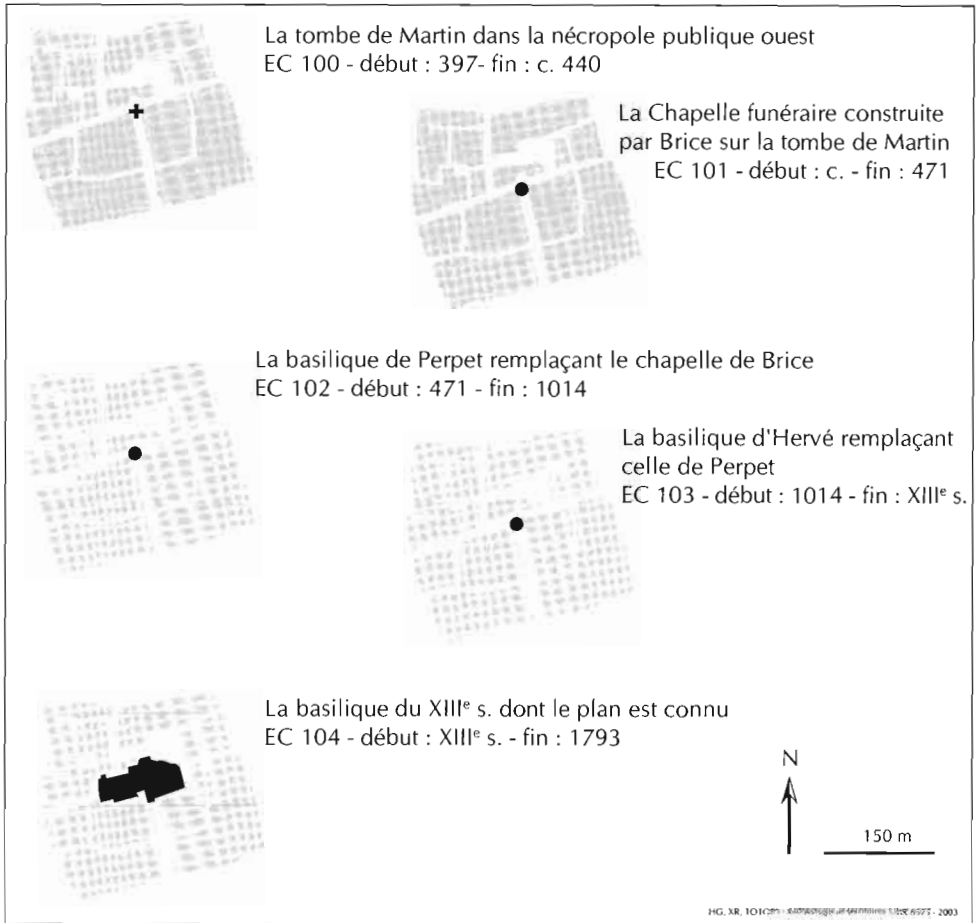
Figure 2 - L'intégration EC, ECC, Ensembles à un moment T



Une même information peut ainsi être utilisée à plusieurs reprises dans la création de plusieurs éléments constitutifs. Il est aussi indispensable, pour des tracés (rues, voies, cours d'eau, remparts) constitués de multiples éléments composites dont la documentation et l'évolution ne sont pas uniformes, de créer des éléments constitutifs composites (ECC) qui regroupent des éléments constitutifs élémentaires (EC). Le tout et les parties peuvent ainsi être considérés à des échelles distinctes. Sur cette base (EC,

ECC), des « Ensembles » peuvent à leur tour être constitués. Ils résultent de regroupements thématiques ou chronologiques d'EC et/ou d'ECC nécessaires à l'analyse de phénomènes divers (Theriault, Claramunt, 1999). La figure 2 présente un exemple de relation entre EC, ECC et Ensemble.

Figure 3 - La succession des EC en un même lieu



Tout élément constitutif doit satisfaire trois conditions : identification fonctionnelle exclusive, localisation, durée d'usage. Tout changement d'usage est traduit par un changement d'EC. Un changement de forme ou d'emprise d'un EC peut ou doit, selon les cas, donner lieu à un changement d'EC. Il n'existe pas de règle pour définir des classes d'EC. Pour avoir une valeur en topographie historique, donc être utiles à la restitution de la dynamique des lieux, les informations concernant la fonction, la localisation et la datation d'un EC doivent satisfaire des conditions qui varient selon la période chronologique considérée. Les seuils à partir desquels une information peut être retenue changent selon les périodes considérées et l'état des connaissances. La précision re-

quise est une affaire d'appréciation. On n'exige pas le même degré d'exactitude pour un élément du ^{v^e-vii^e} s. et un autre du ^{xviii^e} s., dans la définition de la fonction, de la localisation et de la datation.

Pour chaque élément constitutif localisé, la durée est exprimée par des dates calendaires de début et de fin de la fonction et/ou de la forme identifiée. Les requêtes sur un intervalle de temps sont donc susceptibles de sélectionner plusieurs EC successifs, marqueurs de changements (fig. 3).

Tel que défini, l'EC présente un intérêt spatio-temporel. La notation des changements chronologiques à micro-échelle et l'intégration d'un même EC à diverses échelles spatiales à un moment T peuvent être conjuguées. Les relations EC/ECC/Ensembles sont destinées à permettre la prise en compte à diverses échelles du temps et de l'espace.

Application à une ville pré-industrielle

Pour le milieu urbain, les EC sont indexés selon les catégories fonctionnelles définies par le Centre National d'Archéologie Urbaine du ministère de la culture : voirie et aménagements de l'espace, structures défensives et militaires, constructions civiles publiques et privées, édifices religieux, lieux funéraires, structures de production, formations naturelles (Annuaire 2001 : 114). Ces catégories, qui sont elles-mêmes subdivisées en une trentaine de variables, ont fait la preuve de leur efficacité en connaissance imparfaite, pour l'examen de la longue durée, dans la collection des Documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France, publiée depuis une douzaine d'années.

La topographie de Tours pré-industrielle (TOTOPI)

Architecture du système d'information TOTOPI

Pour les recherches sur la ville de Tours des origines au milieu du ^{XIX^e} siècle, il a été créé sous MapInfo puis sous ArcGIS un système d'information intitulé Topographie de Tours Pré-Industrielle (TOTOPI).

Le système documentaire comporte quatre niveaux en interaction :

- les sources,
- les systèmes documentaires transformant les sources en références après critique en incluant les degrés d'incertitude tolérables,
- la confrontation des sources pour l'individualisation de l'EC,
- et l'EC défini comme entité spatiale entrant dans le système d'information ToToPI.

Dans ToToPI, les preuves permettant de définir un EC sont issues de sources réparties en catégories selon la nature et/ou le degré de fiabilité des renseignements attendus. Le regroupement des informations collectées s'effectue par type de sources, de façon progressive. La collecte donne lieu à des systèmes documentaires plus ou moins

élaborés, tableaux ou bases de données, créés selon les orientations et les besoins des programmes de recherche. La finalité du système n'est pas de produire un référentiel documentaire exhaustif mais de permettre la confrontation des informations à des fins d'analyse urbaine.

Les systèmes documentaires peuvent être thématiques (édifices religieux) ou liés à un EC complexe (rempart du IV^e s.), ou à une source particulière (terrier de Saint-Martin du XVIII^e s.). On compte aujourd'hui quatre bases de données enrichies régulièrement : *ArSol* pour les données des fouilles archéologiques, *BaDoPan* pour les forages pénétrométriques, *BaTo* pour les mentions topographiques dans les sources écrites, *BD-ArctTo_L* pour les mentions contenues dans les délibérations et comptes de la Ville et concernant la Loire. Par exemple, il n'existe pas encore de base de données consacrée au bâti, à l'architecture. Des plans anciens ou des vues à vol d'oiseau sont utilisés en images raster de même que des plans terriers sans levé exact, alors que le cadastre du XIX^e siècle a été vectorisé à l'échelle de la parcelle et le plan actuel à celui de l'îlot.

La sélection de l'information s'effectue au niveau permettant à la fois une individualisation des complémentarités documentaires entre les types de sources, des échanges avec d'autres systèmes documentaires informatisés ou non couramment utilisés en archéologie ainsi que des utilisations dans différents contextes d'analyse urbaine.

Le système a pour ambition d'être suffisamment souple pour :

- être renseigné progressivement, donc être immédiatement opérationnel ;
- être un outil de réflexion sur les transformations de l'espace urbanisé ;
- permettre la création permanente de nouveaux Ensembles par regroupement des éléments constitutifs élémentaires ou composites selon des configurations répondant aux besoins que la recherche fait apparaître.

Trois applications de ToToPI

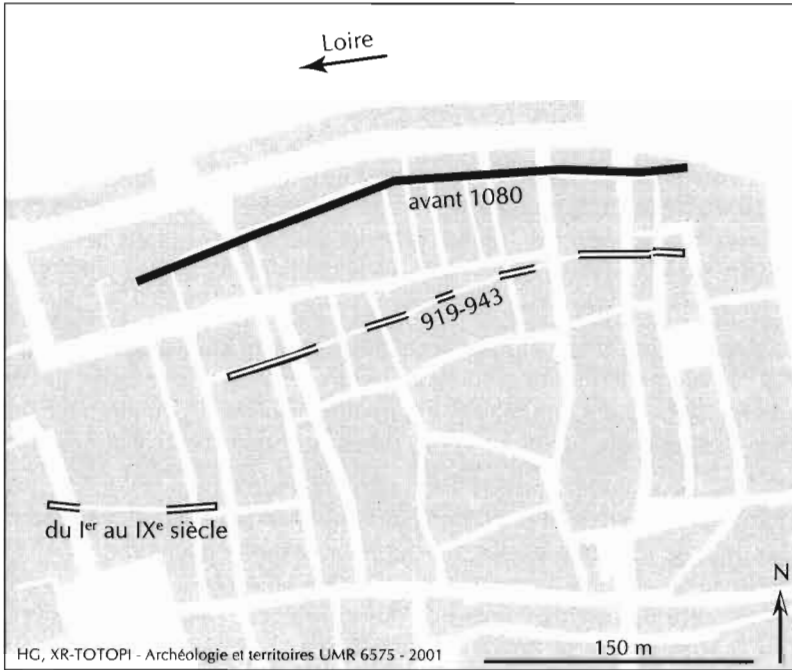
Dans les travaux sur Tours, on se réfère couramment à ToToPI pour vérifier l'état des connaissances en topographie historique à n'importe quel moment T de l'histoire de la ville. Ceci autorise, par exemple, la mise en perspective des observations faites au cours d'une fouille au niveau de l'îlot, du quartier ou de la ville à des dates diverses. On présente ici trois exemples d'application dans des domaines différents : la croissance urbaine, la morphologie urbaine, le dépôt archéologique.

La croissance urbaine

Par la confrontation des données archéologiques, des actes de la pratique des monastères de Saint-Martin et de Saint-Julien du IX^e au XII^e s., des informations des terriers du XVII^e s. reportées sur le cadastre du XIX^e s. vectorisé, il est possible de proposer un schéma de l'évolution du trait de rive du fleuve du I^{er} s. à nos jours montrant un gain dans la Loire de plus de 200 m (Galinié & Rodier, 2001 ; Galinié, Rodier, Seigne et al. à paraître). Sur la figure 4 trois étapes successives montrent les modifications du trait de rive dans l'ouest de la ville. Un premier gain eut lieu au I^{er} siècle de notre ère par la construction de terrasses en bordure du fleuve. Une seconde étape est

identifiée pour le x^e siècle sans que l'on connaisse le processus à l'oeuvre. Une troisième est liée à un gain réalisé avant 1080, peut-être dans le cadre d'une opération d'urbanisme.

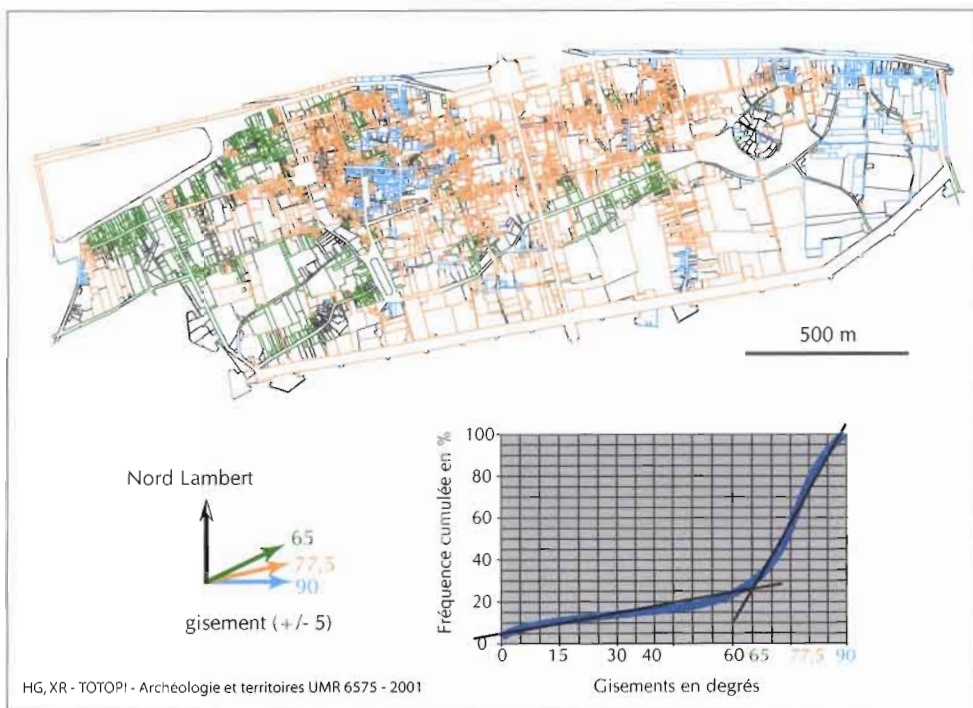
Figure 4 - Les modifications du trait de rive dans l'ouest de Tours



La morphologie urbaine

La vectorisation du cadastre du xix^e s. et le traitement statistique des gisements de la trame ont fait apparaître trois orientations majeures dans le plan (fig. 5). Deux s'expliquent aisément par la configuration de la ville et son rapport au fleuve. L'orientation ocre est déterminée par l'inertie des réalisations alignées sur le fleuve comme l'orientation verte témoigne dans l'ouest de l'inclinaison de la rive gauche en direction du chenal reliant Cher et Loire. Cette inclinaison ouest se retrouve, à la fois au sud de la zone densément urbanisée où elle correspond à des paléo-chenaux mais aussi, contrariée par des réaménagements successifs, à la limite des trames ocre et bleue. La trame bleue pour sa part reste inexplicquée. On est à peu près assuré qu'il ne s'agit pas d'un artefact car ses limites correspondent à des aménagements identifiés, notamment le castrum de Saint-Martin du x^e s. au sud, mais plusieurs hypothèses explicatives doivent encore être examinées. Dans ce cas l'utilisation du SIG a joué un rôle de révélateur de questions insoupçonnées (Rodier, 2000 ; Galinié, 2001 ; Galinié, Chouquer, Rodier et al., 2003).

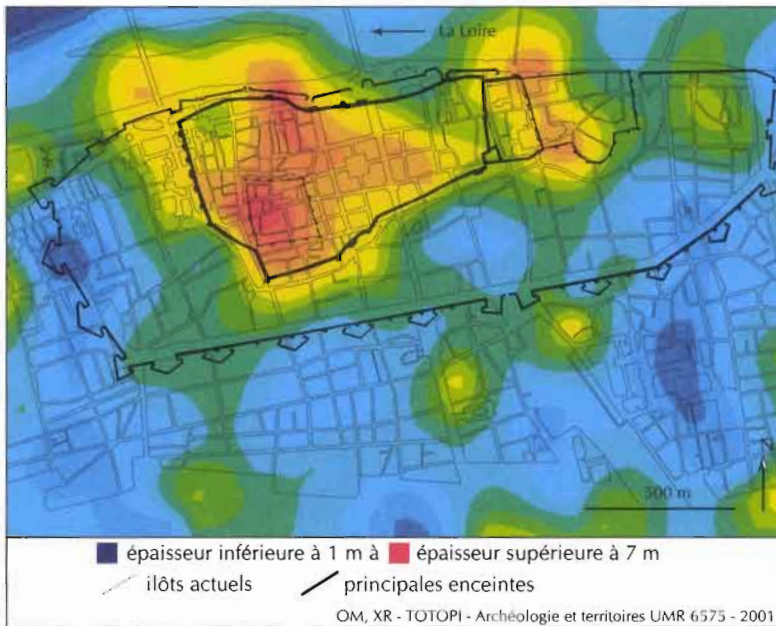
Figure 5 - La structure du tissu urbain de Tours d'après le cadastre du XIX^e s



Le dépôt archéologique

À partir de sondages géotechniques et des travaux sur l'utilisation du pénétromètre en milieu urbain, on s'attache à restituer le modelé du toit des alluvions sur lesquelles la ville a été installée et l'épaisseur du dépôt anthropique qui sépare ce toit de la surface actuelle. Les données provenant de la banque de données du sous-sol du BRGM et des archives de bureaux d'étude ont été collectées et traitées en collaboration avec le BRGM et l'Université d'Angers (Blin, 1998 ; Taberly, 1999) dans le cadre de travaux sur la plaine alluviale de Tours. La fenêtre d'étude a ensuite été réduite pour concentrer les efforts sur l'espace où on dispose de données archéologiques de manière à affiner les modélisations du sous-sol (Marlet, 2000). On a ainsi construit des modélisations (interpolation par Krigeage) du toit du substratum, du toit des sables alluviaux et de l'épaisseur du dépôt archéologique (fig. 6). Les cartes produites ne sont pas de lectures directes et nécessitent une critique approfondie avant d'être interprétées. La modélisation de l'épaisseur du dépôt archéologique offre cependant une image pertinente utile à l'évaluation du potentiel archéologique. Ces travaux constituent une aide à la décision en matière de recherche de terrain (Rodier, 2000 ; Breyse, Niandou, Rodier et al., 2002).

Figure 6 - L'épaisseur du dépôt archéologique à Tours



Applications aux paysages ruraux pré-industriels

Pour l'analyse des paysages, le système élaboré pour le milieu urbain n'est pas directement applicable pour deux raisons :

- la diversité des échelles d'analyse utiles est beaucoup plus importante. L'analyse de l'espace urbain impose une échelle d'analyse qui ne peut guère être inférieure au 1/5 000 ou au 1/10 000 pour que le bâti et les limites de parcelles restent identifiables. Le paysage rural doit pouvoir être analysé, comme la ville, à très grande échelle, pour la prise en compte des fouilles archéologiques, à l'échelle du cadastre pour l'analyse de la morphologie de l'habitat, mais aussi à l'échelle du 1/25 000 ou au 1/50 000 pour la mise en évidence de phénomènes d'organisation portant sur de vastes territoires, par exemple les centuriations, ou pour l'étude des métamorphoses fluviales. L'analyse des systèmes d'habitat ou l'étude de l'organisation et de l'évolution du réseau viaire à l'échelle régionale nécessite des échelles d'analyse encore plus petites, au 1/100 000 ou au 1/250 000.
- les catégories fonctionnelles utilisées en milieu urbain sont rarement applicables en milieu rural sinon pour les bâtiments renseignés par l'architecture, l'écrit ou les plans récents. Le premier niveau d'interprétation fonctionnelle utile est beaucoup plus élémentaire : il peut s'agir par exemple simplement de l'identification d'un lieu habité daté avec plus ou moins de précision. Ces contraintes propres à l'analyse des espaces ruraux déterminent le découpage du monde réel qui doit être opéré

dans le SIG. Les paysages peuvent être décomposés en plusieurs classes d'éléments constitutifs, qui ont chacun leurs propres rythmes de changement, leurs propres échelles d'espace et de temps. Différentes configurations, correspondant à des classes d'éléments constitutifs, peuvent être distinguées dans le SIG : le réseau viaire, le parcellaire, le bâti.

La configuration viaire

La grille d'analyse de la configuration viaire porte essentiellement sur les questions suivantes : la hiérarchisation des voies, la forme et la densité (ou la connectivité) du réseau, ses relations avec le parcellaire, enfin ses transformations. Une voie équivaut presque toujours à un élément constitutif composite (ECC), comprenant n segments individualisés. Les règles de segmentation, donc la définition des éléments constitutifs, varient en fonction des questions posées. Un même tronçon de voie peut appartenir à plusieurs réseaux successifs situés à différents niveaux de la hiérarchie (réseau local, supra-local, régional ou supra-régional) (Vion, 1989). La définition de ces réseaux est fonction de l'importance des agglomérations qu'ils relient ou qu'ils ignorent. L'évaluation du degré de prégnance des tracés et celle de leurs transformations impliquent un autre mode de découpage, en fonction de l'état de conservation du tronçon, qui peut encore jouer un rôle actif dans la voirie actuelle ou ne plus subsister que sous la forme d'un chemin de terre, d'une limite de parcelle, d'une anomalie sur la photographie aérienne. L'objectif de l'analyse est d'identifier différents niveaux d'organisation du paysage, et de relever des éléments de chronologie relative.

La configuration parcellaire

Selon les objectifs poursuivis, la configuration parcellaire peut être considérée comme un réseau d'éléments linéaires (les limites), utiles pour calculer les orientations, ou comme une mosaïque d'éléments surfaciques (les parcelles), utiles pour identifier des modules de superficie, ou les étendues dévolues à tel ou tel type de culture, etc. Les limites peuvent être actives et subsister dans le parcellaire actuel ou fossiles lorsqu'il s'agit de traces visibles sur les photographies aériennes ou identifiées par la fouille. Selon les objectifs de la recherche, l'élément constitutif peut être la parcelle, ou l'ensemble de parcelles dont les limites s'inscrivent dans une même orientation. Le rôle du SIG est de permettre la comparaison de différents états du parcellaire attestés par des documents planimétriques successifs (plans d'époques différentes, missions aériennes depuis les années cinquante).

La configuration du bâti

De tous les éléments du paysage rural, le bâti est celui pour lequel les sources sont les plus variées (architecture en élévation, documents planimétriques, sources écrites, prospection pédestre, aérienne, géophysique, géochimique, fouille). C'est sans doute aussi celui qui est le plus sensible au mode d'acquisition des données : les différentes méthodes, dont le choix est tributaire à la fois de l'occupation actuelle du sol et des moyens disponibles, n'ont pas la même capacité de résolution et les informations qu'elles livrent ne sont pas directement comparables.

En prospection, les bâtiments disparus peuvent être identifiés par des formes visibles sur les photographies aériennes, fossilisés dans le parcellaire des plans cadastraux ou reconstitués par la prospection géophysique. Le plus souvent, ils sont représentés par des taches (Burel, Baudry, 1999), constituées par des épandages de mobilier (céramique, objets, éléments de construction) remontés en surface par les labours. Les «taches» diffèrent des «formes» par le fait que leurs contours ne sont pas significatifs : dans le meilleur des cas, elles donnent une image floue et parfois très déformée (réduite ou au contraire étalée, voire décalée) de l'emprise de bâtiments dont la forme n'est pas directement lisible. L'intérêt du SIG est de permettre la confrontation des images produites par les différentes sources.

La configuration du mobilier

Par mobilier archéologique, on désigne les objets (céramique, verre, monnaies, outils, etc.) rejetés, perdus ou abandonnés par leurs utilisateurs et que l'on retrouve au cours des fouilles ou des prospections dans les champs. Dans ce dernier cas, les vestiges sont remontés à la surface par les labours. L'analyse spatiale du mobilier, indépendamment du bâti et du parcellaire, permet une approche des sociétés du passé à travers la répartition de leurs déchets. Elle sert à identifier des zones de concentration correspondant à une occupation intensive plus ou moins durable (habitats, ateliers de production) et des zones d'activité extensive (épandages liés au fumage des champs). L'élément constitutif peut être la localisation de l'objet individuel comme dans certaines études portant sur la répartition du matériel lithique préhistorique (Thomas, 1975), ou bien l'aire de répartition définie par un seuil de densité du mobilier ou par l'occurrence de tel ou tel type d'artefact (Astill & Davies, 1997). L'analyse du mobilier donne des indications sur la chronologie et la nature des activités, ainsi que sur la place du territoire étudié dans les flux d'échanges d'objets manufacturés.

La configuration des limites territoriales

Les limites territoriales (limites de paroisses, de fiefs, etc.) sont reconstituables à partir des sources écrites, des plans anciens, parfois de l'étude du parcellaire. Leur analyse en tant que structures linéaires permet d'examiner leur relation avec les configurations viaires et parcellaires, le réseau hydrographique et les lignes de crête. Leur analyse en tant qu'entités surfaciques permet d'examiner l'influence du réseau hydrographique, du relief, de la nature des sols et de la localisation des ressources sur l'étendue et la forme des territoires.

Topographie des communes de Tavant, l'Île-Bouchard et Cruzilles (TopoTIC)

L'étude en cours porte sur l'habitat et le paysage des 2 300 ha des communes de Tavant, l'Île-Bouchard et Cruzilles. Toutes les sources d'information disponibles sont prises en compte (sources matérielles, écrites et planimétriques), sans limite de temps (appréhension de la longue durée). Si le SIG permet l'intégration des données, l'étape préalable est celle de leur homogénéisation et de la définition des éléments constitutifs, source par source, aux échelles pertinentes.

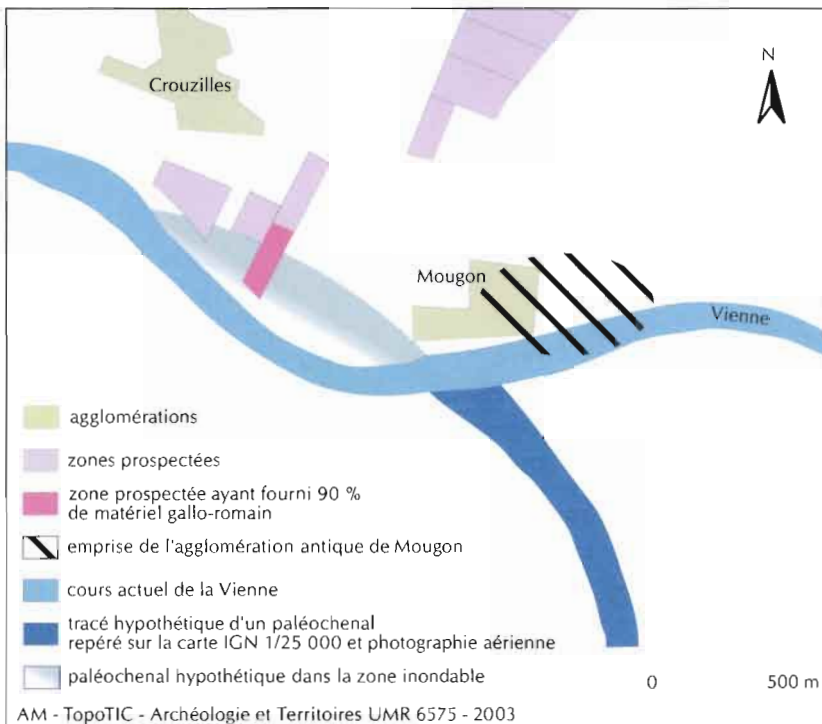
Les sources

Les sources écrites représentent un corpus de 220 textes et liasses, allant du x^e au xix^e s. Elles fournissent des mentions topographiques ayant trait à l'habitat (maisons, cimetières, églises, moulins, voies de communication...) et au paysage (cours d'eau, couverture végétale, cultures...). Chaque mention peut être considérée comme élément constitutif potentiel.

Le problème principal réside dans la difficulté à localiser précisément ces objets à partir du texte seul. Ou bien l'élément est localisé par rapport à un autre objet dont on ignore également l'emplacement précis, ou bien il est localisé par rapport à un ressort territorial dont on ne connaît pas les limites (*pagus*, *villa*...). C'est le cas de la majorité des mentions qui sont donc localisées à une échelle plus petite que l'échelle d'analyse.

Les données archéologiques sont issues d'opérations diverses (fouille, prospection pédestre, prospection aérienne et géophysique) ayant fourni des informations de qualité et de nature différentes en un même lieu, connu et enregistré comme site archéologique dans la base de données Patriarche du Ministère de la Culture ou dans la bibliographie.

Figure 7 - Hypothèses de travail pour la Vienne à Mougou



L'une des questions majeures à résoudre concerne la définition du ou des éléments constitutifs qui correspondent plus ou moins au site archéologique. Qu'est-ce qui détermine le site ou l'EC : sa localisation ? sa fonction ? sa datation ? Par exemple, un

site fouillé dans le bourg de Tavant a révélé deux occupations superposées, un habitat néolithique et une nécropole gallo-romaine. Dans ce cas, les changements de fonction et de datation entraînent un changement d'EC, d'autant plus facilement qu'il y a solution de continuité. Sera également considérée comme élément constitutif toute trace archéologique autre que le site d'habitat : voie ancienne, traces parcellaires fossiles...

La définition de l'unité ou de l'élément se fait au cas par cas, sans règles pré-définies : on peut décider de créer un nouvel élément constitutif si la transformation apportée au site est jugée d'importance pour la question posée (changement de forme, de lieu ou de fonction). Pour les 2300 hectares considérés, les classes d'échelles des EC déterminent les échelles d'analyse envisageables par la suite. Les échelles de temps sont ici moins contraignantes qu'en milieu urbain.

Les sources planimétriques (cadastre, cartes anciennes, photographies aériennes) permettent d'appréhender des aspects divers du paysage : la configuration viaire, parcellaire, le bâti... Le SIG facilite la manipulation des documents et favorise l'approche multiscalaire et la comparaison des sources. Il a permis, entre autres, la réalisation d'une base de données cartographiques s'appuyant sur le cadastre numérisé. Les objets sont localisés à l'aide d'un GPS. Toutes les informations utiles lors de la prospection au sol y sont enregistrées : nom des exploitants, zones prospectées, toponymes cadastraux... Il est donc possible de se repérer, sur le terrain, à partir des informations enregistrées dans la base et également d'enregistrer de nouvelles données.

Par exemple, il peut être établi que le cours de la Vienne a connu des variations puisque le site antique de Mougou a été érodé (présence de vestiges dans le lit actuel). Les résultats de l'analyse des documents planimétriques (cartes IGN, photographie aérienne, cadastre) et de la répartition du mobilier trouvé en prospection corroborent cette hypothèse : la grande quantité de mobilier gallo-romain trouvée dans deux zones en bordure de Vienne a été interprétée comme l'arrachement et la redéposition par la rivière sous la forme d'alluvions, d'une partie du site, quelques mètres en aval (fig. 7). Le repérage sur les documents planimétriques de tracés potentiels de paléochenaux constitue autant d'indicateurs de la mobilité du cours de la Vienne. Les hypothèses de restitution devront être confirmées sur le terrain.

Le système *P*aroisses et communes de *T*ouraine (*PaCT*)

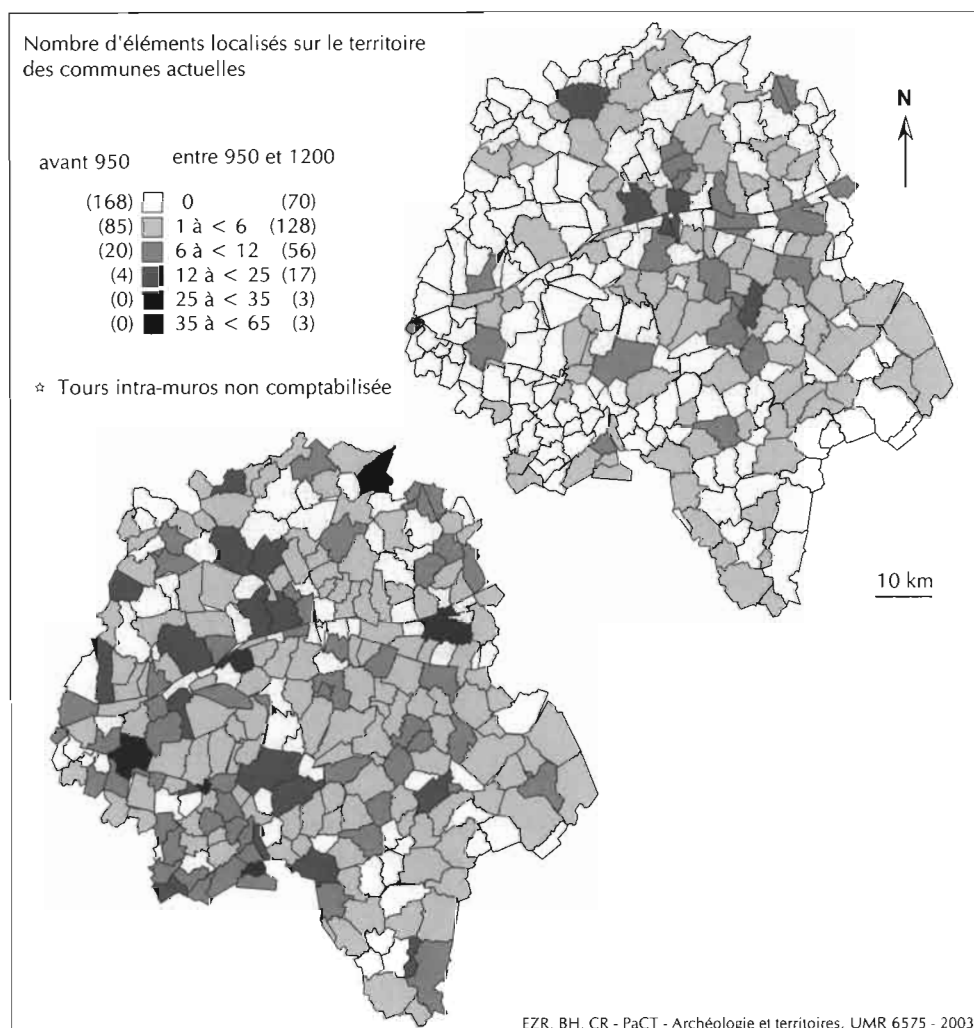
Les recherches sur la genèse du réseau paroissial et communal d'Indre-et-Loire ont donné lieu à la constitution, sous Mapinfo, d'un système intitulé *P*aroisses et communes de *T*ouraine (*PaCT*). Les questions portaient sur les processus de formation des territoires paroissiaux et sur le degré de pérennisation de leurs limites jusqu'aux communes actuelles.

Le système documentaire est constitué de deux bases de données sous 4D. La première, intitulée *Toposources Anjou-Touraine*, contient un relevé de toutes les informations topographiques localisées présentes dans les sources écrites antérieures à 1200 relatives à l'Anjou et à la Touraine. La seconde, intitulée *ComPIL*, contient des données statistiques relatives aux communes et paroisses d'Indre-et-Loire. Le système comporte également trois bases de données cartographiques. La première résulte de la numé-

risation des limites de communes de 1791 reconstituées au 1/25 000 par J.-M. Gorry à partir des procès-verbaux de délimitation. Les deux autres sont la base de données des sols élaborée par la Chambre d'Agriculture d'Indre-et-Loire et l'INRA-Orléans, et la BD-Carto de l'IGN.

Un premier niveau d'éléments constitutifs est représenté par les églises attestées par des mentions dans les sources écrites ou par des vestiges matériels datés. L'analyse est conduite au 1/25 000 : ni la forme de l'édifice, ni son emprise au sol n'entrent en jeu. Ce dénombrement est lacunaire et la répartition par classes chronologiques est faussée par le fait que la première mention peut être postérieure de plusieurs siècles à la fondation de l'église.

Figure 8 - Évaluation de la représentativité des sources écrites antérieures à 1200



Le SIG a été utilisé comme outil d'évaluation de la représentativité des sources, la représentation de l'ensemble des informations localisées dans les sources écrites antérieures à 1200 permet de confronter la répartition des mentions d'églises à la densité des sources par période et fait apparaître les vides documentaires (fig. 8). Elle permet aussi d'identifier les zones qui échappent à la documentation textuelle antérieure à 1200, et celles où l'absence de mentions d'églises n'est donc pas significative.

L'acquisition du statut paroissial par une église entraîne une fonction nouvelle de pôle territorial caractérisé par le monopole des sacrements et du droit de sépulture et par la perception d'un certain nombre de redevances, en particulier les dîmes, sur un territoire délimité. Elle entraîne par conséquent un changement d'élément constitutif. La mise en place du réseau s'est traduite par une sélection des églises : seule une partie d'entre elles a acquis le statut de chef-lieu de paroisse. Le SIG permet d'évaluer l'impact des facteurs topologiques sur cette sélection (distance entre les centres paroissiaux, décentrage par rapport au centre de gravité etc.) par rapport aux facteurs historiques (statut de la localité). Le SIG a été utilisé également pour analyser l'influence de la pédologie, de l'hydrographie et du relief sur la formation des limites territoriales, la taille et la morphologie des communes (Caillé, 1998). Les territoires paroissiaux sont considérés comme des éléments constitutifs composites (ECC) formés de deux éléments constitutifs : d'une part les centres paroissiaux, d'autre part, les limites paroissiales. Les chefs-lieux de communes de 1791, même lorsqu'ils succèdent à un centre paroissial, sont considérés comme de nouveaux EC dans la mesure où ils acquièrent de nouvelles fonctions. Les limites de communes actuelles, lorsqu'elles sont distinctes des limites de 1791, constituent également de nouveaux EC.

Conclusion

Inspiré par la notion d'entité géographique (Lardon, Libourel, Cheylan, 1999), l'élément constitutif, en connaissance presque toujours imparfaite de l'une ou de toutes ses composantes (fonction, localisation, durée) pour les périodes anciennes est soumis à l'appréciation de l'incertitude le concernant par l'expert. À ce jour, dans les systèmes développés, les fonctionnalités de traitement sont celles des SIG utilisés, MapInfo puis ArcGIS, alimentés par des bases de données spécifiques qui permettent, par la confrontation des sources, de réduire l'incertitude de chacune des trois composantes. Ultime étape, le SIG, par la représentation simultanée des données incompatibles à un moment T ou en un lieu précis révèle à l'archéologue les contradictions non résolues, temporelles, fonctionnelles ou topographiques.

Si l'utilisation des SIG en archéologie connaît actuellement un développement très rapide, les applications réellement opérationnelles sont encore peu nombreuses et il est encore trop tôt pour dire si leur utilisation va entraîner un changement des paradigmes (Gaffney & Stancic, 1991 ; Sanders, 1997 ; Archeomedes, 1998 ; Wheatley & Gillings, 2002).

L'effet le plus évident, dont il est encore difficile de mesurer les conséquences épistémologiques, est l'élargissement des bases de connaissances à de nouvelles caté-

gories d'objets caractérisés par leur configuration spatiale. Cette constatation est moins tautologique qu'il n'y paraît. D'une part, l'intégration dans une même base de données de sources de nature très diverse oblige à une formalisation plus rigoureuse et conduit à une réflexion sur les conditions de leur articulation (Gardin, 1994). D'autre part, les facilités d'acquisition de données numériques (MNT, BD-carto, carte des sols, etc.) et leur couplage avec les données archéologiques permettent de poser des questions dont la formulation était antérieurement sinon impossible, du moins extraordinairement laborieuse (ex. calcul des trajets, modélisation de l'influence du relief, de l'orientation des pentes, des types de sols, de la distance à l'eau, etc.). Par ailleurs, la mise en oeuvre des SIG favorise les approches multiscalaires et facilite la modélisation des processus de transformation à l'échelle des éléments comme à celle des ensembles. Enfin, jusqu'à présent, l'espace cartographique était, pour les archéologues et les historiens, un support neutre dont les éléments n'entraient pas véritablement dans le traitement des données. L'approche de l'analyse spatiale était essentiellement statistique (Djindjian, 1991). Les possibilités, mais aussi les contraintes liées aux SIG, même s'il s'agit d'effets collatéraux, imposent de nouveaux découpages du réel qu'illustrent les réflexions présentées ci-dessus sur la notion d'élément constitutif.

Bibliographie

- Annuaire des opérations de terrain en milieu urbain*, Centre National d'Archéologie Urbaine, Tours 2002.
- ARCHÉOMÉDÈS, *Des oppida aux métropoles*, *Archéologues et géographes en vallée du Rhône*, Paris 1998.
- ASTILL G., DAVIES W., *A Breton landscape*, London 1997.
- BLIN C., *Contribution à la géoarchéologie et à la morphogenèse de la Loire dans le Val de Tours. Constitution d'une base de données géologiques*, mémoire de maîtrise, Université d'Angers.
- BREYSSE D., NIANDOU H., RODIER X., GALINIÉ H., LAURENT A., *Le pénétromètre et l'hétérogénéité des sols archéologiques urbains*. *Revue Française de Géotechnique*, 2002, n°100 : 43-58.
- BUREL F., BAUDRY J., *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*, Paris 1999.
- CAILLÉ S., *Étude de l'influence des facteurs pédologiques et hydrographiques sur la morphologie des communes de 1791 en Indre-et-Loire*, Mémoire de maîtrise, Université de Tours, 1998.
- DJINDJIAN F., *Méthodes pour l'archéologie*, Paris 1991.
- GAFFNEY V., STANCIC Z., *GIS approaches to regional analysis : a case study of the island of Hvar*, Znanstveni institut Filozofske fakultete, Ljubljana, 1991.
- GALINIÉ H., *Ville, espace urbain et archéologie. Essai*. Tours : Maison des sciences de la Ville, 2000 (Collection sciences de la ville n°16).
- GALINIÉ H., *La Cité de Tours et Châteauneuf, ville double et double ville* in *Tours, des légendes et des hommes*. Paris : Autrement, 2001 : 172-184 (Collection France, n° 21).
- GALINIÉ H., RODIER X., *Les modifications du trait de la rive gauche de la Loire dans l'ouest de Tours*, in *Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges*, N. CARCAUD ET M.

- GARCIN dir. : 29-36, http://www.brgm.fr/projet_loire/publicat.htm
- GALINIÉ H., RODIER X., ToToPI, un outil d'analyse urbaine, *Les petits cahiers d'Anatole*, 11, 03-12-2002, 12 p., 1 fig., http://www.univ-tours.fr/lat/Pages/F2_11.pdf
- GALINIÉ H., RODIER X., SEIGNE J., CARCAUD N., GARCIN M., MARLET O., à paraître, Quelques aspects documentés des relations entretenues par les habitants de Tours avec la Loire du 1^{er} au 12^e s. in BURNOUF, P. LEVEAU dir. **Actes du colloque d'Aix en Provence** (2002).
- GALINIÉ H., CHOUQUER G., RODIER X., CHAREILLE P., à paraître, Téotolon, doyen de Saint-Martin, évêque de Tours au X^e siècle, et urbaniste ? In GAUTHIEZ B., ZADORA-RIO E., GALINIÉ H., dir., *Du village à la ville au Moyen Âge : les dynamiques morphologiques*, MSH Villes et Territoires, 2 vol., Tours : vol.1, 239-256 ; vol. 2, 201-219.
- GARDIN J.C., Informatique et progrès dans les sciences de l'homme, *Revue Informatique et Statistique dans les Sciences humaines*, 30, 1994, n°1 à 4 : 11-35.
- MARLET O., *Les paléochenaux dans la plaine alluviale de Tours du Tardiglaciaire à aujourd'hui. Intégration des données archéologiques*, mémoire de maîtrise, Université de Tours.
- LARDON S., LIBOUREL T., CHEYLAN J.-P., Concevoir la dynamique des entités spatio-temporelles, In *Représentation de l'espace et du temps dans les SIG*, Revue internationale de géomatique 9, 1999 : 45-65
- RODIER X., Le système d'information géographique TOTOPI : TOPographie de TOurs Pré-Industriel, *Les petits cahiers d'Anatole*, 4, 22-12-2000, 28 600 signes, 5 fig., http://www.univ-tours.fr/Pages/F2_4.HTM
- SANDERS L., Durability of settlement systems : a long term perspective, *10th colloquium of Theoretical and Quantitative Geography* (Rostok 1997), CYBERGEO N° 31, 02-10-97. <http://www.cybergeopresse.fr/rostok/textes/ROSTO09B.HTM>
- SCHIFFER M. B., *Formation Processes of the Archaeological Record*, Albuquerque.
- TABERLY C., *Interprétation lithostratigraphique sur la fenêtre de Tours. Intégration des données géologiques, palynologiques et archéologiques*, mémoire de maîtrise, Université d'Angers.
- THÉRIAULT M., CLARAMUNT C., La représentation du temps et des processus dans les SIG : une nécessité pour la recherche interdisciplinaire, In *Représentation de l'espace et du temps dans les SIG*, Revue internationale de géomatique 9, 1999 : 67-99
- THOMAS D.H., Nonsite Sampling in Archaeology : Up the Creek without a Site ? In : MUELLER, J.W. ed., *Sampling in Archaeology*, Tucson 1975 : 61-81.
- VION E., L'analyse archéologique des réseaux routiers : une rupture méthodologique, des réponses -nouvelles, *Paysages découverts* n° 1, GREAT, Lausanne, Suisse, 1989 : 67-99.
- WHEATLEY D., GILLINGS M., *Spatial Technology and Archaeology, The Archaeological Applications of GIS*, Londres et New York 2002.

La sémiologie graphique et la conception de cartes thématiques dans les SIG : nouvelles méthodes, nouvelles images

Philippe QUODVERTE, Université d'Orléans, France
E-mail : philippe.quodverte@univ-orleans.fr

Résumé : Les Systèmes d'information géographique, au carrefour de nouvelles technologies (multimédia, Internet...) ont fait apparaître de nouvelles possibilités de réalisation de cartes thématiques. Ils ont aussi introduit de nouvelles possibilités graphiques qui peuvent aisément compléter le langage graphique défini par Jacques Bertin. Au-delà de ces nouvelles variables visuelles ou autres paramètres permettant de créer une carte, par le biais de deux exemples (la représentation en deux dimensions et le mouvement), il est question ici de proposer une méthode permettant de combiner différentes variables dans le but de concevoir et de réaliser des cartes innovantes ou originales à l'aide d'un SIG.

Mots clés : Cartes thématiques, variables visuelles, mouvement, troisième dimension (3D), SIG, méthode combinatoire.

Graphic semiology and the conception of thematic maps in GIS : new methods, new images

Abstract: *Geographic Information Systems, stimulated by new technologies (multimedia, internet...) have developed new capacities in thematic mapping. They have also introduced new graphical possibilities complementing the graphical language defined by Jacques Bertin. Beyond new visual representations and other parameters allowing cartography, this paper focuses on giving, through two examples (bi-dimensional and movement representation), a method based on multi-variable combinations for the conception and implementation of innovative or original cartographies by GIS.*

Key words: *Thematic mapping, visual variable, movement, tri-dimensional (3D), GIS, combinative method.*

Introduction

Avec la diffusion et l'utilisation de plus en plus massive des Systèmes d'information géographique (SIG), la cartographie est devenue incontournable pour l'analyse et la gestion de l'espace géographique. Outil essentiel d'aide à la décision, la cartographie s'est largement répandue grâce aux progrès considérables des ordinateurs et des logiciels intervenus depuis ces 20 dernières années. Rendant désormais possible

la réalisation de cartes thématiques, des plus simples aux plus sophistiquées, cette évolution rapide pose le problème de l'adaptation du cadre théorique de la sémiologie graphique de Jacques Bertin. Après un rappel des principes du langage graphique nous verrons comment il a été pris en compte dans les logiciels SIG et par ceux qui les utilisent. Avec deux exemples, la représentation en trois dimensions et le mouvement, de nouvelles variables (visuelles ou non) seront définies et compléteront la sémiologie graphique. Enfin, au-delà de cet aspect théorique, une méthode de conception de cartes thématiques sera proposée pour apporter aux concepteurs de cartes de nouvelles possibilités de représentation et d'analyse.

La sémiologie graphique à l'épreuve des SIG

La sémiologie graphique, une base théorique bien établie

C'est en 1967 qu'a été publiée la Sémiologie graphique de [Bertin, 1967]. Ouvrage très remarqué et innovant, son contenu a été critiqué par les universitaires de l'époque. Comme le font remarquer Palski et Robic [1997] c'est un livre à part, surprenant, en particulier par son absence de notes et de bibliographie. Fondée sur l'analyse de nombreux documents graphiques et cartographiques, la sémiologie graphique n'en demeure pas moins une des bases méthodologiques essentielles pour les cartographes.

La sémiologie graphique souligne les trois fonctions de l'image (inventaire, instrument de traitement de l'information et message). Elle définit les propriétés spécifiques de la représentation graphique par rapport aux autres systèmes de signes. Et bien qu'elle soit présentée comme un système fini, la sémiologie graphique peut être complétée [Palski & Robic, 1997]. Le traité de Bertin appartient définitivement à l'histoire de la constitution du champ sémiotique, et est cité comme tel dans les travaux modernes de philosophie ou d'analyse du langage visuel [Palski & Robic, 1997].

Il est nécessaire de replacer la sémiologie graphique dans son contexte des années cinquante à soixante-dix pour mieux comprendre le cheminement théorique. La cartographie était très dépendante d'autres techniques, d'autres métiers, en particulier ceux de l'édition. Par exemple, l'utilisation de la couleur était très limitée. Une carte colorée ne pouvait exister qu'à la condition d'être imprimée, ce qui la rendait coûteuse et peu accessible au plus grand nombre. C'était le règne de la carte papier réalisée en noir et blanc [Quodverte, 1994]. C'est pour cela que J. Bertin a développé l'essentiel de sa théorie en noir et blanc et en deux dimensions. Pour des raisons similaires, le mouvement n'a pas été développé dans l'ensemble de sa théorie.

La sémiologie graphique dans la carte : le cadre théorique

La représentation graphique est la transcription dans un système graphique de signes, d'une pensée, d'une information connue par l'intermédiaire d'un système de signes quelconque (...). La représentation graphique est une partie de la sémiologie, science qui traite de tous les systèmes de signes [Bertin, 1967].

Le principe consiste donc à séparer le contenu (qui peut rester constant) du système de signes qui permet de le communiquer. L'important dans cette problématique, c'est de bien transcrire graphiquement l'information pour pouvoir comprendre son contenu. Jacques Bertin appelle information le contenu traductible d'une pensée. Cette information peut être transcrite dans un système de signes adaptés, le système graphique [Bertin, 1967].

L'auteur a considéré que le système graphique était composé de 8 variables visuelles dont 6 variables rétinienne [Bertin, 1967] : la position (2 dimensions du plan), la taille, la valeur, le grain, la couleur, l'orientation et la forme. Ces variables visuelles s'organisent en fonction des primitives graphiques qui sont : le point, la ligne, la zone.

Des limites graphiques dues aux technologies

Depuis sa publication, la sémiologie graphique de Jacques Bertin a été confrontée à l'apparition progressive de l'informatique. Dans les années soixante-dix et quatre-vingt, les cartes thématiques ont été dessinées à l'aide de traceurs et d'imprimantes dotés d'une technologie limitée, avec des ordinateurs peu performants et des programmes sommaires. Les cartes produites étaient alors facilement identifiables (fig. 1, 2 et 3). Petit à petit, les techniques évoluant, les cartes sont devenues plus précises, se sont colorées et surtout sont devenues moins coûteuses. L'écran cathodique, d'abord graphique, puis en couleur a été une révolution pour la cartographie. Parallèlement les logiciels se sont multipliés, et sont devenus plus conviviaux, permettant de réaliser des cartes de qualité [Quodverte, 1994].

Figure 1 et 2 - Cartes réalisées sur imprimantes non modifiées

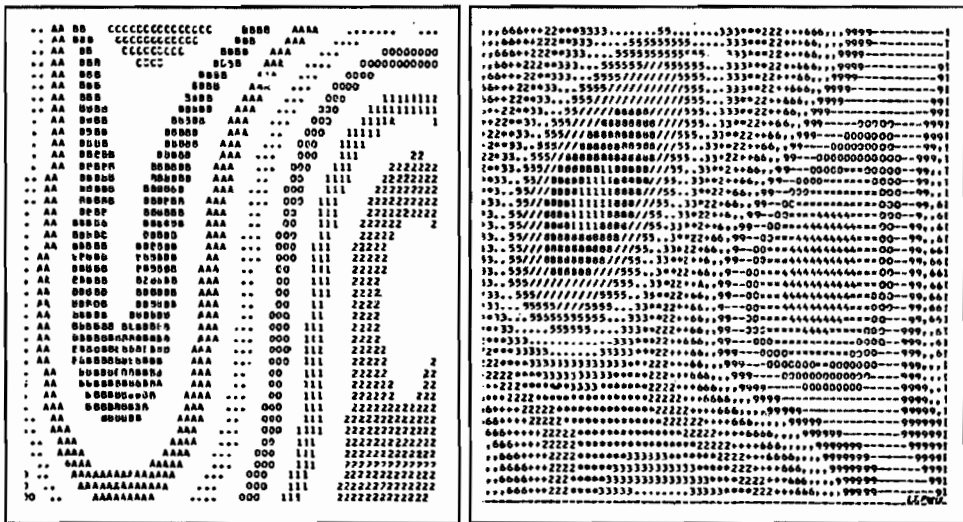
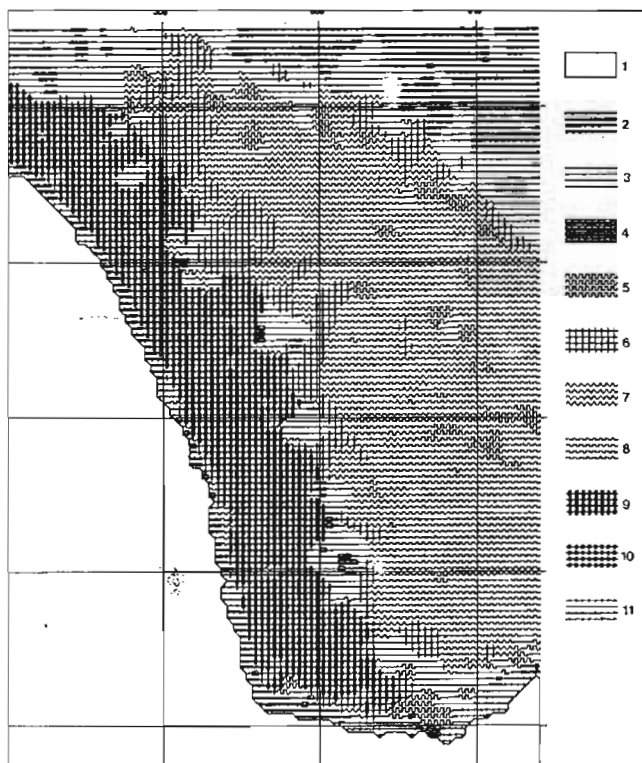


Figure 3 - Carte des environs de Longeville réalisée sur traceur



Bulletin du comité Français de Cartographie n° 83-84, mars-juin 1980, p. 19

Dans la période suivante (1980 à 2000) les ordinateurs sont devenus de plus en plus performants permettant ainsi aux logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO) et de Systèmes d'information géographique (SIG) de se répandre. Mais cela a eu des conséquences importantes pour la prise en compte des règles élémentaires de la sémiologie graphique d'autant plus que la cartographie thématique a été utilisée de façon systématique.

Un appauvrissement sémiologique ?

Les outils de DAO, largement utilisés dans les métiers de la topographie et de la cartographie d'édition, n'ont pas changé fondamentalement l'aspect des plans et des cartes. L'informatique a permis d'automatiser le dessin manuel et il a surtout amélioré les performances de la production de plans et de cartes. Mais les topographes et les cartographes maîtrisaient toujours le contenu et la forme du produit cartographique grâce à leur savoir-faire.

En revanche lorsque les SIG se sont largement répandus, tous les corps de métier ont eu accès à ces technologies. Si les cartes n'étaient pas toujours une de leurs prio-

rités, elles étaient parfois utiles par exemple pour qu'un élu prenne une décision ou pour qu'il mène des actions de communication auprès du grand public. C'est alors que l'absence de connaissances dans les domaines de la topographie et de la cartographie pouvaient poser des problèmes. Conscient de ceux-ci, le Conseil national de l'information géographique a rapidement créé une commission « métiers » qui a été transformée ultérieurement en groupe « formation – recherche ». Quelques diplômes universitaires ont alors été créés (DEA, DESS, MST). Dans le même temps, des formations aux logiciels ont été proposées par les éditeurs de SIG et par d'autres organismes compétents.

Parallèlement on constatait que les développeurs de logiciels ne prenaient pas toujours en compte toutes les règles élémentaires de la sémiologie graphique et de la conception cartographique. Certains logiciels par exemple, ne permettaient pas de construire des cartes quantitatives en utilisant la variable taille. Les utilisateurs étaient alors incapables de réaliser des cartes dans les règles de l'art. Dans certains logiciels, le catalogue de signes ponctuels, linéaires et zonaux était prédéfini, certaines fonctions d'analyse statistique faisaient défaut et des couleurs ou trames ne pouvaient pas être modifiées [Quodverte, 1994]. Des progrès notables sont intervenus depuis et les logiciels ont été améliorés. L'augmentation des performances des traceurs et des imprimantes a largement contribué à l'amélioration des cartes (précision des traits et qualité des couleurs). Mais cette période a été à l'origine de nombreuses « catastrophes visuelles » :

Concernant la forme :

- variables visuelles inadaptées (variable valeur au lieu de la taille),
- dégradés de couleurs non conformes (non ordonnés visuellement),
- utilisation de couleurs trop nombreuses,
- teintes trop saturées,
- traits crénelés,
- mise en page médiocre,
- superposition anarchique de signes ponctuels, linéaires et zonaux ...

Concernant le fond :

- absence de titre, de légende, d'auteur, de sources,
- légende et titre mal rédigés,
- pas de discrétisation (statistique ou graphique),
- pas de problématique précédant la conception de cartes,
- cartes de synthèse rares ; prolifération de cartes de corrélation graphique...

Si l'on examine la production cartographique dans ESRI Map book 2001, on peut constater que les cartes d'analyse représentent environ 46,5 % des cartes produites, les cartes de corrélation graphique (superposition ou juxtaposition de 2 ou x signes sur une carte) représentent environ 50,5 % alors que les cartes de synthèse ne représentent que 3 %.

Si dans la plupart des cas, les cartes d'analyse ne posent que peu de problèmes de représentation ou de conception, les cartes de corrélation graphique sont à l'origine

de bien des problèmes sémiologiques. La superposition et la juxtaposition de signes sont souvent mal gérées.

Malgré tout, compte tenu de l'amélioration des possibilités des logiciels et de la multiplication des formations à la cartographie, la qualité des cartes s'est globalement améliorée. Au-delà des problèmes sémiologiques évoqués précédemment, les SIG sont une aubaine pour le monde de la cartographie. Jamais le nombre de cartes utilisées n'a été si élevé. Les SIG se sont diffusés dans tous les domaines où l'espace géographique doit être géré. Les bases de données se sont enrichies et développées. Dans un bon nombre de collectivités territoriales comme par exemple à Nantes ou Orléans, nous constatons que la phase de constitution des bases de données (topographiques, cadastrales et cartographiques) est en voie d'achèvement. Par conséquent l'exploitation des données attributaires s'intensifie et conduit à la création de cartes thématiques toujours plus nombreuses. La communication visuelle de l'information devient donc une préoccupation essentielle.

Les SIG, innovations et nouveaux concepts

Les logiciels SIG offrent de plus en plus de possibilités pour résoudre les problèmes de gestion et de représentation de territoires. Depuis quelques années les SIG ont intégré d'autres technologies comme le multimédia [Kraak & Ormeling, 1996] et Internet. On peut prendre comme hypothèse que l'association de ces trois technologies est génératrice d'innovations et conduit à développer d'autres variables qui s'ajoutent à celles de Bertin.

D'après une étude réalisée par des étudiants du DESS de géomatique de l'Université d'Orléans sur le Web pour déceler les systèmes de représentation cartographiques les plus innovants, il est ressorti que la représentation 3D, le mouvement et l'interactivité étaient celles qui arrivaient en tête. À partir de la 3D et du mouvement pris comme exemple, peut-on dire que nous avons de nouvelles variables visuelles ? Quelle est la place du SIG dans ce contexte d'innovations en matière de représentations cartographiques ?

La troisième dimension (3D). L'exemple du Modèle numérique de terrain (MNT)

La représentation du relief en trois dimensions d'un espace géographique est une problématique bien connue des cartographes. Un modèle numérique de terrain est généralement défini comme une représentation numérique des caractéristiques du terrain [Kraak & Ormeling, 1996]. La représentation en 3D est une technique déjà ancienne puisqu'elle a été développée pour la mécanique, l'imagerie médicale, la modélisation moléculaire et les sciences de la terre [Jones, 1996].

Les applications du modèle numérique de terrain sont nombreuses dans le domaine de l'aménagement et de l'urbanisme, de l'environnement, de la protection civile

et de l'armée [Michel, 2002]. Les techniques de simulations de vol utilisent beaucoup les MNT, en y ajoutant un paramètre supplémentaire, l'animation. C'est ce qu'on appelle de la « réalité virtuelle ». Le MNT 3D dynamique peut alors être piloté en « temps réel ». Il peut aussi être drapé d'images satellitaires, de photographies aériennes ou de cartes topographiques pour donner un effet proche de la réalité. On est alors bien loin des premières représentations des modèles numériques de terrain de l'Institut Géographique National des années soixante-dix de type fil de fer.

La représentation du modèle

Les paramètres de construction du modèle (angle de vue, le z, le type de maillage et sa résolution, le mouvement) constituent le « squelette » du MNT. Les autres paramètres (l'ombrage, les représentations réalistes, le drapage d'image raster et le mouvement) améliorent l'aspect visuel du modèle numérique de terrain. En ce qui concerne l'ombrage (plastic shading), les procédures sont issues des principes d'éclairage dans l'art et des principes psychologiques de la perception de la profondeur [Mac Eachren, p. 141]. Mais pour être efficace, l'ombrage, appelé aussi texture de l'ombrage ou encore valeur, doit être positionné par le cartographe en fonction de ses connaissances étendues en géomorphologie. La mise au point de l'ombrage par procédé informatique a été rapidement un succès. L'éclairage provenant d'en haut à gauche est habituellement cité comme le meilleur [Mac Eachren, 1995].

Le MNT peut encore être drapé d'une couleur uniforme dans le but de faire apparaître des ombrages et des courbes de niveau. Ces dernières seront mises en valeur par un dégradé de gris ou de couleurs allant du plus clair au plus foncé. Dans certains cas, la couleur peut être transparente pour faciliter la lecture et surtout pour une meilleure compréhension du phénomène.

Le modèle numérique de terrain souffre de deux défauts majeurs, l'existence de parties cachées (due à la perspective) et l'absence d'échelle sur l'image. Malgré la précision de tous les paramètres de construction, le MNT demeure une image toujours très déformée par le choix de l'azimut, l'inclinaison du modèle, le choix de l'angle de vue et la distance du point d'observation. Il est donc une image de communication où il est impossible d'effectuer des mesures comme sur une carte. Compte tenu de tous les paramètres de construction et d'amélioration de l'image, il apparaît comme un « système de représentation cartographique » parmi les plus compliqués. Si l'on prend en compte les dix paramètres permettant de construire un modèle numérique de terrain, on peut en déduire que chacun d'entre eux modifie son aspect visuel.

Si l'on examine le tableau 1, on peut constater que les paramètres nécessaires pour construire l'image et l'améliorer sont nombreux. Mais parmi tous ceux-ci, certains peuvent être considérés comme des variables visuelles spécifiques, telles que l'ombrage, la perspective et, dans une moindre mesure, le mouvement. Elles peuvent alors être ajoutées au langage graphique défini par Jacques Bertin.

Tableau 1 - Les différents paramètres de construction et d'amélioration de l'aspect visuel d'un MNT

Construction du modèle	
1	Perspective (angle de vue)
	Angle de vue perspective frontale ou oblique définition d'un angle de vue (azimut) point d'observation inclinaison : vue au-dessus de la ligne d'horizon vue au-dessous de la ligne d'horizon vue au même niveau < 15°
2	Distance d'observation
	effet de perspective + ou - prononcé
3	Pas de perspective
	Axonométrie
4	L'altitude
	Variation du z pas de variation (même échelle que x et y) exagération ou réduction de l'échelle des hauteurs (pour rendre l'image plus réaliste)
5	Type de maillage
	Variation de la forme et de la surface de la maille de taille fixe carrée ou rectangulaire de taille variable : réseau de facettes triangulaires (Triangulated Irregular Network / TIN)
6	Résolution de la maille
	grossière fine
Amélioration de l'image	
7	Ombrage (sur le modèle)
	Variation de l'éclairage éclairage depuis une source ponctuelle éloignée et repérée par un azimut et une élévation éclairage intense ou atténué
8	Drapage (sur le modèle)
	carte topographique ou thématique photographie aérienne image satellitale couleur uniforme
9	Représentation réaliste (utilisation des fractales)
	paysage arbres (plantes) rochers nuages
10	Mouvement
	Variation du point de vue rotation autour du modèle numérique survol du modèle numérique (animation)

Le mouvement

Autre exemple considéré comme innovant : le mouvement. L'œil est capable de détecter le moindre petit mouvement d'un objet dans son environnement quotidien.

On peut le définir comme un changement de place, de position d'un élément visuel par rapport à un système de références défini (la carte). L'animation est un procédé permettant d'obtenir des images dont certains éléments bougent. Le mouvement peut-il aider à la compréhension de tous ces phénomènes et comment se rattache-t-il au langage graphique de Jacques Bertin ?

L'aspect temporel des représentations spatiales

Les données spatiales ont trois composantes : la position, l'attribut et le temps [Sinton, 1978]. Bien qu'elle n'apparaisse pas toujours dans les définitions officielles de la carte et des SIG, la notion de temps est pourtant une dimension fondamentale dans les problématiques de géographie et d'aménagement. Le temps modifie les territoires en proie aux mutations : la croissance urbaine accentue la consommation de l'espace rural, des grandes zones d'activités industrielles déclinent, disparaissent ou se déplacent. On pourrait multiplier les exemples. Le cartographe va donc trouver des moyens visuels, des méthodes pour cartographier ces évolutions, ces changements et bien sûr ces déplacements (d'activités, de personnes, de marchandises...). La solution graphique en deux dimensions la plus connue est l'emploi de la flèche. Il est aussi possible de simuler le mouvement grâce à des animations temporelles ou non temporelles.

Les animations temporelles

Plusieurs techniques sont employées pour simuler le mouvement ou le défilement du temps. La première méthode consiste à faire défiler une succession d'images fixes d'une représentation cartographique traditionnelle. Comme le souligne [Métral, 2001] cela rejoint de manière assez naturelle l'expérience directe que nous avons du temps : une succession d'événements. Le déroulement du temps s'effectue selon un mode linéaire.

Les animations temporelles font apparaître des éléments essentiels : la localisation graphique, représentée par la carte elle-même et le temps (ou la date). C'est ce dernier point que l'on appelle la « dimension temporelle » [Kraak & Ormeling, 1996]. Le temps est alors réduit et représenté par une échelle spécifique. Mais l'unité de temps peut être différente (minutes, heures, jours, mois, années ou siècles).

Sur les cartes animées, la perception du temps peut être simulée à l'aide d'une légende temporelle comme par exemple une échelle qui se remplit, un texte qui défile, une horloge qui tourne ou le déplacement de la carte sur un axe [SIG la Lettre, n°42, 2002].

Les animations non temporelles

Les animations non temporelles ne sont pas directement liées au temps. Les éléments dynamiques de la carte sont utilisés pour montrer des relations spatiales et pour clarifier les caractéristiques attributaires ou géométriques de phénomènes spatiaux [Kraak & Ormeling, 1996].

L'animation non temporelle, en affichant des constructions successives d'un phénomène sur une carte, va permettre de montrer des changements de représentation d'un même phénomène. Par exemple on affiche un modèle numérique de terrain, ensuite un projet d'autoroute, puis l'occupation du sol, permettant ainsi de mettre en rapport les trois éléments.

D'autres changements de représentation ont pour origine :

- la manipulation des attributs (différents traitements de données),
- la manipulation graphique (courbes, MNT, anamorphose, etc.). Dans ce cas on change de méthode de représentation cartographique à partir des mêmes données,
- le clignotement des symboles pour attirer l'attention sur certaines localisations,
- les effets de zoom,
- la simulation de vol à travers un paysage (changement continu).

Un objet peut aussi varier de taille ou de volume en fonction de l'augmentation de la quantité qu'il représente. Il peut changer également de forme : carré en cercle, cube en sphère. Cité dans [SIG la Lettre, n° 42, 2002], l'exemple de l'ouragan est significatif. En effet, grâce à l'animation, il est possible de voir sa rotation, son augmentation de volume, sa trajectoire. Ce sont autant d'éléments permettant de prévoir son déplacement et d'estimer sa puissance.

Le suivi de flotte consiste à visualiser, par affichage successif, des véhicules sur un fond de carte fixe (en temps réel ou différé). Dans ce cas, il ne s'agit plus de simuler le temps mais de le prendre en compte dans toute sa dimension. Le suivi d'un déplacement en temps réel utilise des signes ponctuels ou des signes zonaux permettant, par exemple, d'observer l'évolution d'une crue d'un fleuve, de nappes de pétrole en cas de pollution maritime.

Une sémiologie spécifique ?

Appliquées à la cartographie, les techniques d'animation sont considérées, comme de véritables variables visuelles [Di Biase, Mac Eachren, Krygier, Reeves, 1992]. Jacques Bertin considérait seulement l'animation comme une variable additionnelle [Mac Eachren, 1995]. On peut comprendre sa position en considérant qu'une carte 2D peut être animée, sans pour autant modifier les autres variables visuelles utilisées.

Mais Mac Eachren, [1995] va beaucoup plus loin et détermine des variables spécifiques qu'il appelle « variables dynamiques » :

- 1-L'affichage temporel (display time) : c'est le moment où apparaît un changement sur la carte. L'affichage est lié à la chronologie des cartes.
- 2-La durée : c'est la persistance d'un phénomène sur une période plus ou moins longue.
- 3-La fréquence : est liée à la durée (la fréquence des trains par exemple). C'est le caractère qui se répète souvent ou ce qui se produit périodiquement. La fréquence peut être faible ou importante.
- 4-L'ordre : il s'applique aux séquences d'images ou de scènes. Cela permet de montrer la diffusion ou la régression d'un phénomène dans un espace géographique et sur une période donnée.
- 5-Le taux de changement : c'est la différence d'importance d'un changement par unité de temps. Le taux de changement peut être constant ou variable, lent ou rapide ; il peut également ne pas y avoir de changement.
- 6-La synchronisation : c'est la correspondance temporelle entre deux séries de temps ou plus. Il est donc possible de comparer les incidences de l'une sur l'autre.

Par contre [Block, 2000] ne considère pas le taux de changement et la synchronisation comme de véritables variables mais plutôt comme des effets de données sous-jacentes ou de l'interaction entre les autres variables.

On peut ajouter une autre variable aux manipulations graphiques, comme par exemple le son. Peterson [1995] en ajoute d'autres comme l'ombrage, la vitesse, le point de vue, la distance au point de vue et le fondu enchaîné. D'après les travaux de recherche menés par Koussoulakou & Kraak [1992], les cartes animées présentent l'information plus rapidement que les cartes statiques. Elles sont encore mieux appréciées si la notion de temps est contrôlée par l'utilisateur. Ceci montre que la notion de temps est un paramètre important à prendre en compte dans le processus de mémorisation de l'image.

Les animations nous permettent de représenter le passé, de comprendre le présent et de décrire le futur. C'est le cas aussi pour les cartes animées [Peterson, 1995]. L'animation peut être utilisée pour détecter des similitudes ou des différences dans une série de cartes. C'est surtout possible lorsque l'on peut accéder interactivement à chaque image dans une animation. L'émergence des SIG a augmenté la demande de cartes intégrant la composante temporelle [Kraak & Mac Eachren]. Mais si les SIG savent aujourd'hui représenter des suites distantes d'un objet, ils ne savent pas encore effectuer des analyses complexes [SIG la Lette n° 42, 2002].

Sémiologie et méthodes de conception de cartes

La corrélation graphique dans les SIG

Le SIG peut-il être considéré comme un moyen d'innover en combinant toutes les variables ? La première réponse est de considérer que le SIG permet de cartographier un grand nombre de thèmes sur des couches différentes à partir d'un même référentiel géographique. Il est possible de croiser toutes ces informations en superposant deux couches ou x couches. L'analyse se fait alors à partir de cette superposition d'information que l'on appelle la « corrélation graphique » ou « corrélation cartographique », puisqu'il s'agit simplement de superposer ou de juxtaposer des informations [Quod-verte, 1997]. En aucun cas la carte résultante ne peut être considérée comme une carte de synthèse.

En ce sens le SIG, par la superposition de couches, permet une analyse très détaillée du territoire. Chaque corrélation graphique est par conséquent originale et constitue une carte unique, que l'on peut qualifier de nouvelle, puisque jamais vue jusqu'alors. Cependant elle ne peut être considérée comme innovante qu'en fonction de son contenu, non par ses modes de représentation.

Le SIG est un outil apprécié dans la mesure où il crée des associations thématiques originales permettant d'appréhender l'espace géographique et d'en dégager des informations utiles à la décision. Cependant, si les cartes ainsi produites sont originales, le processus lui ne l'est pas, puisqu'il a toujours été pratiqué. La superposition de cartes

thématiques sur un fond de référence unique pour établir des cartes d'aide à la décision, était déjà utilisée dans les années soixante-dix par les aménageurs dans le cadre d'études préalables à l'implantation d'autoroutes.

Cependant, la sémiologie graphique étant conçue séparément pour chaque couche, certaines combinaisons graphiques (superposition de couleurs par exemple) ne sont pas possibles. Il est alors indispensable de réaliser des cartes de synthèse indépendantes, en fusionnant les éléments en types, en nouvelles catégories.

Méthode combinatoire de conception de cartes

Il est relativement simple de cartographier en deux dimensions et de construire une image à partir des variables visuelles. En effet, les règles d'utilisation de ces dernières sont bien connues, réglementées et ont été largement répandues dans un bon nombre de manuels de cartographie. La conception de cartes thématiques devient alors plus complexe si l'on souhaite associer, combiner des variables visuelles entre elles en y ajoutant d'autres variables comme la 3D, le mouvement ou l'interactivité et le son.

Le tableau 2 montre l'ensemble des variables utilisables pour construire une carte. On y retrouve les variables visuelles, et le mouvement.

Tableau 2 - Les variables utilisables pour concevoir des cartes thématiques dans les SIG

	Variables visuelles 2d	Variables visuelles 3d	Variable son
variables principales	taille	idem 2d + volume	
	valeur	idem 2d + ombrage	
	couleur	idem 2d + transparence	
	texture - grain	idem 2d	
	orientation	idem 2d	
	forme	idem 2d	
	position x y	position x y + z	
	Variable mouvement		variable son
variables secondaires	affichage temporel	idem 2d	
	durée	idem 2d	
	fréquence	idem 2d	
	ordre	idem 2d	
	taux de changement	idem 2d	
	synchronisation	idem 2d	
		temps réel	
	interactivité		

Le « temps réel » a été ajouté à la variable mouvement puisqu'il peut induire un déplacement sur la carte. L'objet qui se déplace sur le terrain modifie la carte. L'interactivité ne peut pas être considérée comme une variable visuelle ; c'est le lecteur, l'utilisateur de la carte qui intervient, modifie, discrétise les données, effectue des zooms et modifie la carte suivant ses besoins.

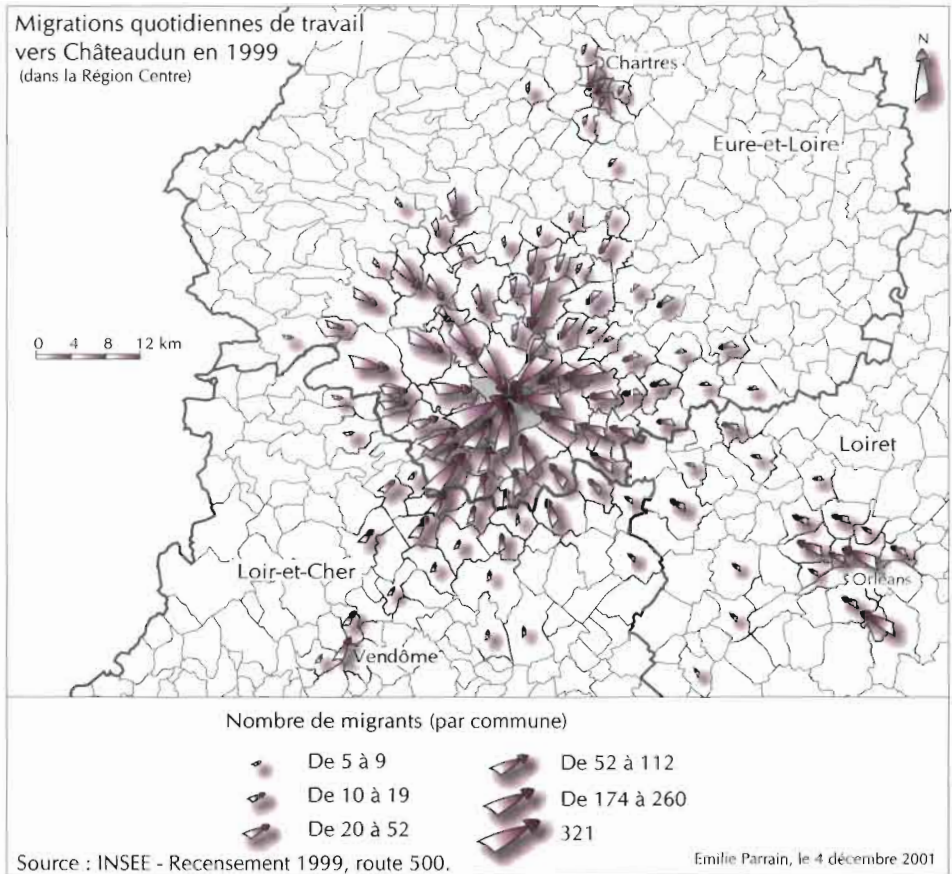
Le tableau 3 montre que la combinaison de plusieurs variables permet aux différents systèmes de représentation de faire apparaître d'autres phénomènes. Les anamorphoses par exemple, qui font varier les surfaces d'unités statistiques en fonction de nombres, peuvent être combinées à la variable mouvement. Cela conduit à créer une anamorphose animée, carte tout à fait innovante [voir sites Internet n° 1-3]. Le résultat est assez spectaculaire, mais l'interprétation de ces cartes reste difficile.

Tableau 3 - Exemple d'application de la méthode combinatoire pour concevoir des cartes innovantes dans les SIG.

		Système de représentation cartographique			
		Anamorphoses	Mailles	MNT	Flèches
Variables visuelles	Taille surface - volume				
	Valeur gris - couleur				
	Ombrage				
	Couleur uniforme - dégradés				
	Texture				
	Orientation				
	Forme				
	2D				
	3D				
	Mouvement				
	Interactivité				
	Temps réel				

La figure 4 représente les migrations quotidiennes de travail vers Châteaudun. Le système de représentation par flèche permet d'associer plusieurs variables (visuelles ou non) pour réaliser des cartes innovantes. Il est possible d'associer la taille de la flèche (quantité de migrants) à sa forme, à son orientation, puis de renforcer l'effet de convergence vers la ville, avec un dégradé de couleur. Cet effet est encore amélioré par l'ombre portée de la flèche. Cette association de variables rend ainsi la carte très caractéristique. Il est également possible d'y ajouter, par exemple, la variable mouvement qui permettrait de visualiser le point de départ et le point d'arrivée et même de laisser une trace du passage de la flèche sur le territoire traversé.

Figure 4 - La représentation des migrations par des flèches. Exemple de combinaison de variables (forme, taille, orientation, couleur-valeur, ombrage)



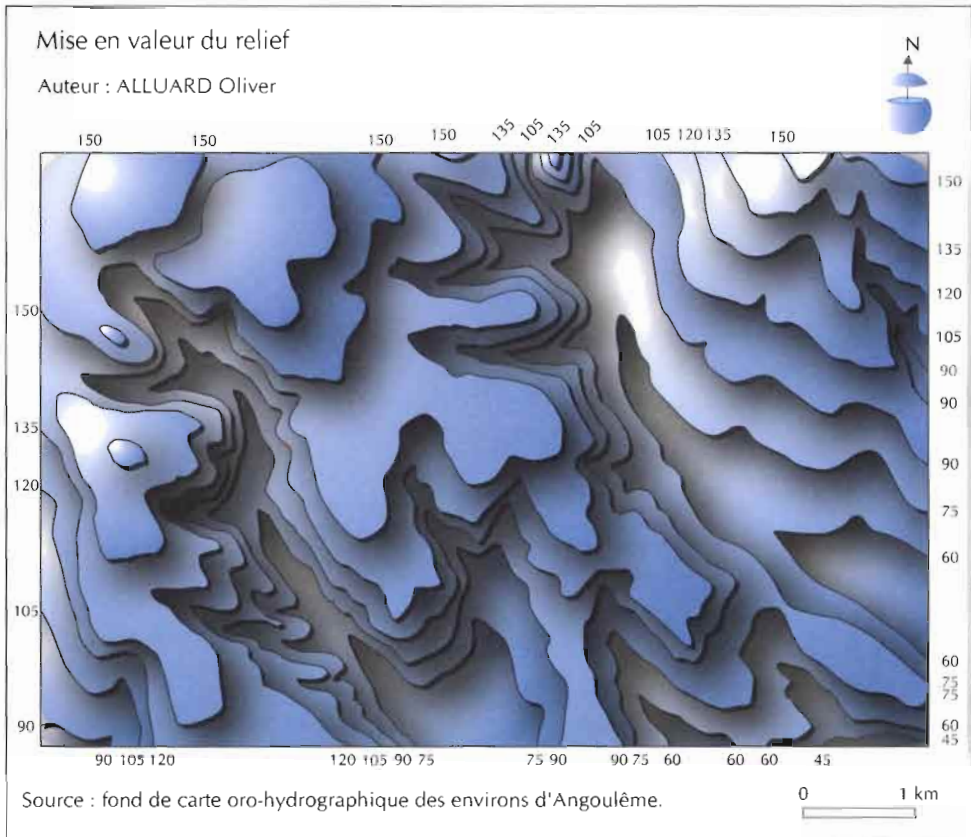
La figure 5 représente le relief des environs d'Angoulême. Pour simuler l'effet du relief, l'auteur a combiné des dégradés de couleur pour chaque altitude avec des courbes de niveau renforcées (ombrage en fonction d'un éclairage venant du haut de l'image à gauche). Cette combinaison de variables donne un effet du relief tout à fait saisissant, même s'il paraît un peu accentué pour la région considérée.

Cette méthode combinatoire permet à ceux qui réalisent des cartes d'effectuer des associations pertinentes de variables pour répondre à une problématique particulière. Les combinaisons de variables favorisent la résolution de problèmes de conception de cartes complexes ou de mieux faire apparaître un phénomène géographique. Cette méthode permet de rechercher l'innovation dans le but d'améliorer l'aspect « communication » de la carte auprès d'un public identifié (décideurs, grand public, etc.).

La méthode combinatoire est donc utilisable et adaptable par chacun, pour imaginer de nouvelles associations de variables, visuelles ou non, qui permettent d'enrichir

les représentations de l'espace géographique. Cela peut poser parfois de problèmes de lisibilité et d'interprétation qui restent à évaluer pour définir des règles de construction graphique plus pertinentes.

Figure 5 - Carte du relief des environs d'Angoulême. Exemple de combinaison de variable (couleur-valeur, ombrage)



Conclusion

La cartographie, élément essentiel dans la structure logicielle des SIG, lorsqu'elle est utilisée pour l'analyse, la gestion de territoires et la communication de l'information, doit respecter les règles élémentaires de la sémiologie graphique. Si les premiers outils SIG ne permettaient pas de construire des cartes visuellement satisfaisantes, les logiciels se sont bien améliorés.

Jacques Bertin a développé sa théorie bien avant la mise au point des SIG. Il ne pouvait donc pas prévoir un tel développement, de telles possibilités graphiques. Cependant, depuis 1967, la sémiologie graphique est une base théorique et pratique solide pour les cartographes. Elle demeure une référence, un guide pour tous ceux qui

souhaitent créer des cartes de qualité. Mais elle doit aussi, sans trahir son auteur, être complétée et enrichie pour tenir compte des innovations graphiques actuelles dans le domaine des SIG. Ainsi, la troisième dimension, l'ombrage, le mouvement et éventuellement le son, s'ajoutent aux variables visuelles.

La combinaison de variables à un système de représentation, aboutit à la découverte de nouvelles associations conduisant à la création de cartes thématiques originales et innovantes. Avec cette méthode combinatoire, les utilisateurs de SIG approfondissent leurs problématiques, explorent toutes les possibilités graphiques et résolvent des problèmes complexes de représentation cartographique.

Références bibliographiques

- BERTIN J. *Diagrammes, réseaux, cartographie. Sémiologie graphique*. Paris : Ed. Gauthier - Villars, Mouton, , 1967. 431 p.
- BERTIN J. *La graphique et le traitement graphique de l'information*. Paris : Ed. Flammarion, 1977. 277 p.
- BLOK C.A. 12-13 décembre 1997. Dynamic visualization in developing frame work for the representation of geographic data. Colloque *30 ans de sémiologie graphique*, Institut de Géographie, Paris.
- BLOK C.A. 2000. Monitoring change : characteristics of dynamic geo-spatial phenomena for visual exploration. In : FRESKA C., BRAEUR W., and WENDER K.F. Eds. *Integrating abstract theories, emperical studies, formal methods ans pratical applications*, p. 16-30.
- Bulletin du comité Français de Cartographie* n° 63, mars 1975, p. 50.
- Bulletin du comité Français de Cartographie* n° 83-84, mars-juin 1980, p. 19.
- CHEYLAN J.-P. Mars 1994. Cartographie et SIG, les règles de base. *SIG et Télédétection* n° 10. p. 7-9.
- CHEYLAN J.-P. 1997. SIG et Cartographie. *Bulletin du Comité Français de Cartographie* n° 151-152. p. 22-34.
- DI BIASE D., MAC EACHREN A.M., KRYGIER J.B., REEVES C. 1992. Animation and the role of map design in scientific visualisation. *Cartography and GIS*, n° 19 (4). p. 201-214.
- DI SALVO M., TROISPOUX G.. *La 3^e dimension géographique*. Lyon : Ed. CERTU, dossier n° 124. 2001, 98 p.
- ESRI Map book* 2001. ESRI PRESS, Ed. Nancy Sallington.
- IMHOF E. *Cartographic relief presentation*. Berlin : Ed. Walter de Guyter, 1982.
- JONES C. B. *GIS and computer cartography*. Harlow : Ed. Longman, 1996. 319 p.
- KOCH W.G. 1999, June 25-26. The graphic system of visual variables, its development and signigance in a multimedia environnement. In : *meeting in Geneva, ICA working group on map semiotics*. Geneva, Suisse.
- KOUSSOULAKOU A., KRAAK M.J. 1992. Spatio temporal map and cartographic communication. *The cartographic journal*, vol. 29-2, p. 101-108.
- KRAAK M.J., MAC EACHREN A.M. 1994. Visualisation of the temporal composant of spatial data. *Advances in GIS Research*, vol. n° 1.
- KRAAK M.J., ORMELING F.J. *Cartography : visualisation of spatial data*. Harlow : Ed. Longman, 1996. 222 p.

- LAARIBI A. *SIG et analyse multi-critère*. Ed. Hermès, Paris, 2000. 190 p.
- LAURINI R., MILLERET-RAFFORT F. *Les bases de données en géomatique*. Paris : Ed. Hermès, 1993. 340 p.
- MAC EACHREN A. M. *How maps work. Representation, visualisation and design*. New York : Ed. The Guilford Press, 1995. 513 p.
- METRAL G. 10 septembre 2001. Images du temps : représentation et dynamiques territoriales. Colloque *Epistémologie de la carte et de l'innovation en cartographie*, journée Cartogram. Paris.
- MICHEL B. Décembre 2002. Évolution de la représentation du relief d'Oronce Finé aux modèles numériques de terrain. *Bulletin du Comité Français de Cartographie*, n° 173-174, p.21-28.
- PALSKY Gilles, ROBIC Marie-Claire. 12-13 décembre 1997. Aux sources de la sémiologie graphique. *Colloque 30 ans de sémiologie graphique*. Institut de Géographie, Paris.
- PETERSON M. P. *The futur of animated Maps*, <http://maps.unomaha.edu/Perterson/methods/Research/Zale/Future.html>, 4 p.
- PETERSON M. P. *Interactive an animated cartography*. New-York : Ed. Prentice Hall Series in Géographic Information Science, 1995. 257 p.
- POLIDORI L. *Cartographie radar*. Amsterdam : Gordon an Breach science publishers / OPA, 1997. 287 p.
- QUODVERTE P. *La cartographie numérique et l'information géographique*. Thèse de doctorat d'Etat. Orléans : Université d'Orléans - CERCAR, 1994. 769 p.
- QUODVERTE P. Septembre 1997. La représentation cartographique ou l'art de concevoir des cartes. *Bulletin du Comité Français de Cartographie*, n° 153, p. 19-31.
- QUODVERTE P. Penser autrement la cartographie. Cartographie, SIG et Géomatique. *Bulletin du Comité Français de Cartographie*, septembre 1997, n° 153, p. 32-37.
- QUODVERTE P. avril 2003. Systèmes d'information géographique. In *Dictionnaire de la géographie et des sciences de l'espace des sociétés*, sous la direction de LEVY J. et LUSSAULT M. Ed. Belin, Paris, p. 886-889.
- ROWLES R.A. 1978. Perception of perspective – blockdiagrams. *American Cartographer*, n° 5, p. 331-334.
- SIG la Lettre*, décembre 2002, n° 42.
- SINTON D. The inherent structure of information as a constraint to analysis : mapped thematic data as a care of study. *Harvard paper on GIS*, vol. n° 7.
- WHEATE R. *Re-examining the cartographic depiction of topography in cartographic design. Theoretical and pratical perspectives*. Ed. Wood. C.H., Keller P.C., Wiley & Son Ltd, Chichester, England, 1996, p. 147-155.

Sites internet, animations

- www.geog.qmw.ac.uk/ngis/conference/cartogram.html *Cartogram of males of working age as a percentage of total male population 1851-1911.*
- www.viz.tamu.edu/faculty/house/cartograms/DecadeAnim.html *Progression of us population cartograms from 1990 to 1996.*
- www.mimas.ac.uk/argus/ICAJ.Dykes/3.3.html *Figure 5a : spatial structure trough linked cartograms transient symbolism.*

Sites internet, 3D :

- <http://www.karto.baug.ethz.ch/research/research6.html>
- <http://www.opten.ru/eng/altm/dtm/dtm.html>

Activité, chômage et territoires en France, analyse spatiale et modélisation locale

Jean-Marc ZANINETTI, Université d'Orléans, France
Email : Jean-Marc.Zaninetti@univ-orleans.fr

Résumé : Les préoccupations principales de la géographie sont très différentes de celles de l'économie. Tandis que la modélisation économétrique recherche les déterminants d'un phénomène, l'analyse spatiale met l'accent sur les disparités régionales ; l'autocorrélation spatiale et la non-stationnarité des relations dans l'espace sont des préoccupations centrales. C'est pourquoi la modélisation en analyse spatiale ne peut pas être un décalque des méthodes de l'économétrie. Les logiciels SIG offrent justement l'opportunité de développer de nouvelles techniques en analyse spatiale quantitative. Cet article entend présenter les méthodes de modélisation locale les plus récentes au travers d'une application. L'étude des disparités régionales du taux de chômage en France et des relations qu'il entretient avec les taux d'activité selon le sexe et l'âge illustre la spécificité de cette approche. Les avancées récentes en analyse spatiale répondent à ce besoin. En premier lieu, l'analyse exploratoire des taux de chômage utilise l'indice généralisé d'autocorrélation spatiale et l'indicateur local d'association spatiale qui lui est associé. Ensuite la modélisation locale des relations entre chômage et activité démontre la diversité des marchés régionaux du travail en France.

Mots clés : autocorrélation spatiale, non-stationnarité spatiale, régression géographique pondérée, modélisation locale, taux de chômage, taux d'activité selon le sexe et l'âge, marchés régionaux du travail.

Activity, unemployment and territories in France: How GIS improve modelling in quantitative spatial analysis

Abstract: *The main concerns of Geography are very different from those of Economy. While econometric modelling seeks the determinants of a phenomenon, Spatial Analysis puts emphasis on regional disparities; spatial autocorrelation and spatial non-stationnarity of relationships are central concerns. This is the reason why modelling in spatial analysis cannot be a transfer of the methods of econometrics. Hence, GIS software give the opportunity to develop new techniques in spatial data analysis. This article is intended to present the newest methods in local modelling through an application. The study of regional disparities in the unemployment rate of France and the relations that it maintains with the activity ratios according to sex and age illustrates the specificity of this approach. The recent advances in spatial analysis meet this need. Firstly, the exploratory analysis of the unemployment rates uses the generalised index of spatial autocorrelation and the local indicator of space association, to which it is linked. Then the local modelling of the relations between unemployment and activity shows the diversity of the regional labour markets in France.*

Key words: *spatial autocorrelation, spatial non-stationary, geographic weighted regression, local modelling, unemployment rate, activity ratios according to sex and age, regional labour markets.*

Introduction

Comment les systèmes d'information géographiques (SIG) permettent-ils d'améliorer la modélisation en analyse spatiale quantitative ? La micro-informatique a une vingtaine d'années d'existence, et on peut dire qu'elle a suscité une certaine démocratisation de l'analyse spatiale quantitative. Des logiciels spécifiques ont été développés. Ils sont interfacés avec les SIG et offrent de nouvelles perspectives de développement à l'analyse spatiale appliquée. Le but de cette communication est de mieux faire connaître aux chercheurs francophones quel est l'état de l'art dans le monde anglophone, et en particulier quelle nouvelle méthode de modélisation locale a été développée grâce au couplage de l'analyse spatiale et des SIG. Pour cela, nous allons développer un exemple concret, la relation entre activité, chômage et territoires en France selon les résultats du recensement de 1999. Ce sera l'occasion d'examiner quelle place le SIG occupe dans la recherche.

Depuis de nombreuses années, les études économiques ont souligné la particularité des structures démographiques de la population active en France. Face à un fort chômage structurel, la société française s'est adaptée en retardant l'entrée des jeunes sur le marché du travail, avec l'allongement de la durée des études et en évinçant de la vie active les personnes de plus de 50 ans (préretraites, abaissement de l'âge de départ à la retraite). Cela concentre la population active sur les classes d'âge de 25 à 49 ans. Cette situation singularise la France dans l'Union Européenne (Zaninetti 2002) où l'on trouve en général une proportion plus forte d'actifs jeunes et âgés. En contrepartie, la France mobilise davantage le potentiel d'activité féminine, en particulier entre 25 et 49 ans.

On s'interroge ici sur la relation qui existe entre les structures par sexe et âge de la population active et les taux de chômage à l'échelle des zones d'emploi. Dans quelle mesure ces deux structures sont associées quand on considère que le chômage touche principalement les jeunes, les femmes et les actifs de plus de 50 ans ? La situation est-elle la même partout en France ? L'analyse du marché du travail s'attache naturellement au cadre national. Par sa législation unifiée, la France métropolitaine constitue un marché du travail que l'on considère généralement comme homogène. Le recensement général de la population est pourtant l'occasion de voir que cette homogénéité est toute relative. Avec 26,5 millions d'actifs et 550 000 km², on peut s'attendre à ce qu'il y ait un certain cloisonnement régional des marchés du travail. Les 348 zones d'emploi de l'INSEE constituent l'échelle d'observation adéquate des marchés locaux du travail. Cet article s'intéresse à la relation qui unit localement le taux de chômage et les taux d'activité selon le sexe et l'âge. Doit-on considérer le marché du travail français comme un ensemble homogène ou doit-on au contraire considérer isolément des marchés régionaux du travail où les équilibres entre activité, chômage et démographie sont sensiblement différents, malgré l'uniformité de la législation ?

Un modèle de régression linéaire classique, qui ignore la localisation des territoires observés n'est pas approprié. C'est pourquoi les chercheurs de l'université de Newcastle, MM. Brunsdon, Charlton et Fotheringham ont développé une nouvelle métho-

dologie de modélisation locale. Ils l'ont baptisé régression géographique pondérée (anglais *Geographic Weighted Regression GWR*).

Modélisation géographique pondérée

La pratique de la régression linéaire, résolue selon la méthode classique des *moindres carrés ordinaires* (MCO) est largement répandue dans les sciences sociales depuis longtemps. Géographes et économistes mesurent rapidement ses imperfections (Cliff et Ord 1973, 1981, Cressie 1991-93).

On écrit l'équation matricielle $Y = X\beta + \varepsilon$. La première partie du membre de droite est déterministe et la seconde est aléatoire. L'intérêt du modèle réside dans le vecteur β des coefficients qui maximise la relation linéaire qui existe entre la variable endogène Y et la matrice X des prédicats associés. Les équations normales fournissent la solution¹ de l'ajustement statistique. Les coefficients du modèle représentent toutefois une relation moyenne qui n'est pas nécessairement stable sur l'ensemble de l'espace étudié, problème connu sous l'appellation de *non-stationnarité spatiale*.

L'*autocorrélation spatiale* est un autre biais systématique. C'est une caractéristique bien connue des données mesurées de manière exhaustive sur les territoires. Elle résulte des effets de débordement qui font que la situation en un lieu est influencée par celle des localités voisines. En théorie, son existence introduit un biais systématique dans l'estimation des paramètres de la relation. De plus, les résidus du modèle ne sont pas indépendants, ce qui signifie que la composante géographique du modèle linéaire reste dans la partie aléatoire du modèle, ce qui interdit d'en faire une interprétation analytique, puisque les résidus représentent tout à la fois les interférences spatiales, les caractères influents qui n'ont pas été pris en compte expressément dans le modèle, et un « bruit » statistique ininterprétable. Les modèles autorégressifs spatiaux (anglais *Spatially Auto Regressive model SAR*) ont apporté une première réponse.

On localise l'observation I par ses coordonnées planaires. Le SIG intervient donc une première fois dans la méthode par le pré-traitement des données qui renseigne les coordonnées planaires des observations. On reformule le modèle linéaire en introduisant une matrice d'influence W et un scalaire, ρ , tels que $Y = X\beta + \rho WY + \eta$.

ρ est le coefficient de corrélation entre le vecteur Y et le vecteur WY des moyennes de valeurs adjacentes. L'estimation du vecteur de coefficients β est extraite de l'équation suivante : $Y = (I - \rho W)^{-1} X\beta + (I - \rho W)^{-1} \eta$. Toutefois, le modèle SAR répond mieux aux attendus méthodologiques de l'économétrie qu'à ceux de l'analyse spatiale. En effet, il transfère l'autocorrélation spatiale de la partie aléatoire à la partie déterministe du modèle, non pas pour l'analyser mais pour en neutraliser l'effet. On recherche des causes générales après correction des effets spatiaux sur le niveau de la variable endogène. Le modèle SAR produit une équation unique pour l'ensemble de l'espace d'étude. Préoccupé par l'explication des relations entre les variables, le modèle SAR évacue le problème de la non-stationnarité spatiale de ces relations.

¹ Le vecteur β est extrait de l'équation suivante : $\beta = (X'X)^{-1}(X'Y)$

Le modèle de régression GWR repose sur une base théorique différente. Son objectif est de décomposer le modèle linéaire en ses composantes locales pour analyser la non-stationnarité spatiale de la relation. Il transfère également l'autocorrélation spatiale de la partie aléatoire à la partie déterministe du modèle, mais en produisant une matrice de coefficients locaux, il permet d'observer les effets proprement géographiques.

Le logiciel **GWR** calcule n modèles linéaires locaux par la méthode des moindres carrés ordinaires en introduisant un jeu de n matrices diagonales de dimension $n \times n$ W_i exprimant la pondération des observations autour de l en fonction d'une fonction de distance. Dans une matrice diagonale, seule la trace de la matrice comporte les valeurs positives des poids spatiaux w_{ij} , les autres cases étant à 0. Le vecteur des coefficients est calculé au moyen de l'équation normale : $\beta_i = (X'W_iX)^{-1} (X'W_iY)$.

L'étape la plus délicate est de définir la matrice des poids. On peut définir une notion de proximité qui est une fonction décroissante de la distance entre les points de mesure. Dans les secteurs où le semis est peu dense, ou alternativement lorsque les polygones sont de grande étendue, l'échantillon local pris en compte dans la matrice W_i est petit, ce qui rend l'estimateur peu stable. C'est pourquoi Brunson, Charlton et Fotheringham, (2000) proposent d'utiliser un rayon d'influence flexible.

L'utilisateur définit la dimension k de son échantillon local. Puis choisit un indicateur de poids fondé sur le rang de distance.

Soit h_i la distance au k^e voisin J le plus proche de l , alors $w_{ij} = \left[1 - \left(\frac{d_{ij}^2}{h_i} \right)^2 \right]^2$ si $d_{ij} \leq h_i$.

Le coefficient w_{ij} est nul si cette condition n'est pas respectée.

Le choix de la dimension k reste à la discrétion du chercheur et dépend beaucoup du jeu de données sur lequel il travaille.

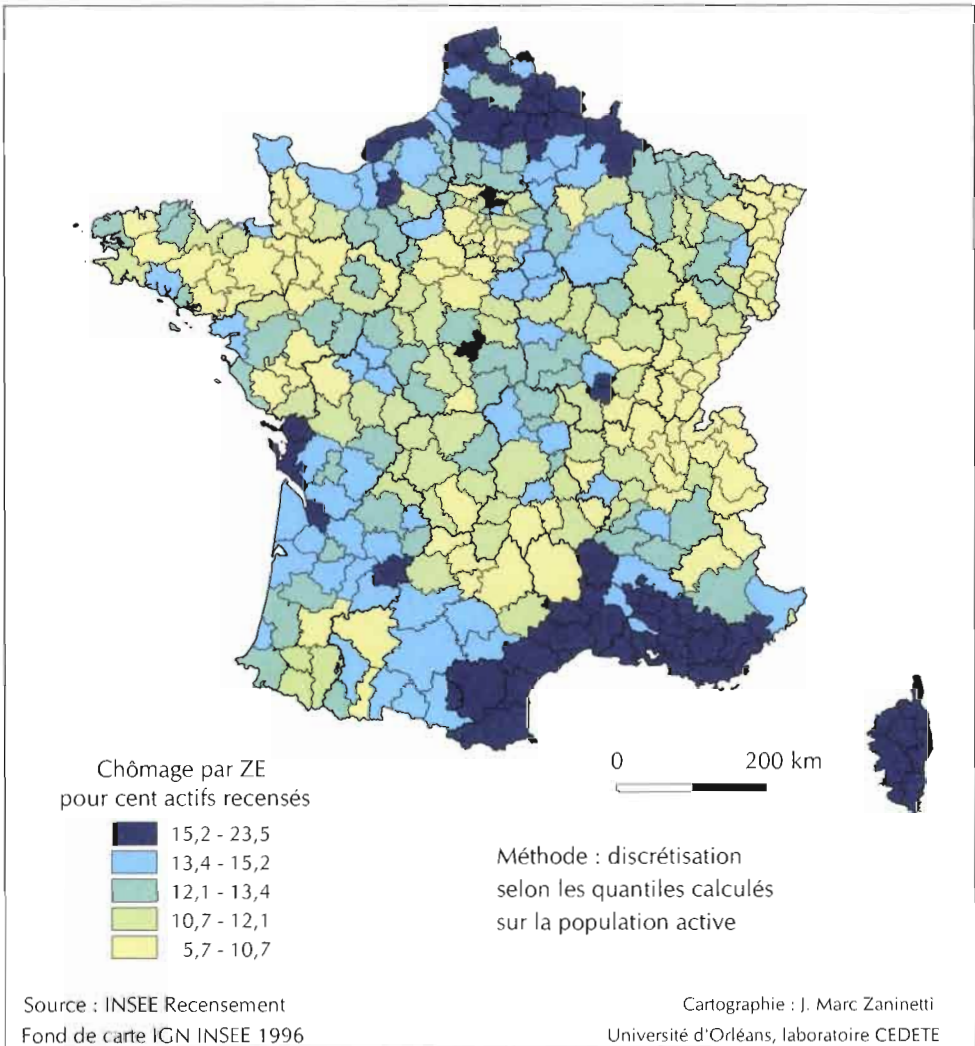
En sortie de l'analyse, on peut comparer le gain de qualité de représentation du modèle GWR par rapport au modèle MCO global, mais on dispose surtout d'une table des coefficients β_i locaux, de la qualité locale de l'ajustement et d'un certain nombre de mesures d'influence des observations sur le modèle qui permettent de déceler des singularités éventuelles susceptibles d'avoir biaisé les estimations. Le SIG intervient de nouveau en aval du processus de modélisation pour visualiser les résultats de l'analyse.

En intégrant pleinement l'organisation spatiale de l'information géographique, la modélisation GWR procure à l'analyse spatiale un « réalisme » conforme aux normes de la discipline. Cette méthode ne se substitue pas aux modèles économétriques. En effet, l'objectif du modèle GWR n'est pas tant « d'expliquer » le niveau de la variable endogène par celui des variables indépendantes que de démontrer la diversité régionale des conditions d'équilibre entre ces caractères. On peut donc considérer qu'il s'agit d'un développement de la panoplie des méthodes d'investigations complémentaires de l'analyse spatiale, qui sont mieux à même de répondre aux besoins des géographes que les méthodes économétriques.

Disparités du taux de chômage entre les zones d'emploi françaises en 1999

Plus de 13 % des actifs se sont déclarés au chômage au dernier recensement. Bien que la définition du chômage au sens du recensement soit considérablement plus large que la définition officielle du BIT², elle est cohérente et suffisante à notre propos, puisqu'elle permet de comparer les territoires entre eux sans qu'il y ait d'incertitude sur le dénominateur, la population active au lieu de résidence, que seul le recensement permet de dénombrer avec précision.

Figure 1 - Taux de chômage en France par zone d'emploi 1999 (au sens du recensement)



² Bureau international du travail

Selon cette définition, la situation des zones d'emploi françaises était fort variable, allant d'un minimum de 5,7 % pour la zone d'emploi d'Altkirch dans le Haut Rhin, à proximité de Bâle à un maximum de 23,4 % pour la zone d'emploi d'Alès dans le Gard. La distribution du taux de chômage par zone d'emploi suit une distribution normale avec une moyenne des taux de 12,7 % et un écart type de 3,3 % autour de cette moyenne. Par contre la répartition géographique du phénomène n'est pas du tout aléatoire.

La carte (fig. 1) représente un espace fortement différencié et très organisé. Un actif sur cinq habite dans une zone d'emploi où le taux de chômage déclaré au recensement était inférieur à 10,7 %. Ces zones sont groupées d'abord dans le Centre Est du pays, en Alsace, Franche-Comté et en région Rhône-Alpes tout autour de la frontière suisse. On distingue trois autres ensembles régionaux de moindre chômage qui appartiennent à la France intérieure : le Sud du Massif central, le Grand Ouest et l'Île-de-France Ouest et Sud, étendue au nord de la région Centre voisine (Orléans et Chartres). À l'inverse, les zones les plus touchées par le chômage se concentrent dans quatre ensembles régionaux. Les trois régions méditerranéennes, Corse, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte-d'Azur forment l'ensemble le plus étendu. Les régions riveraines de l'Atlantique semblent connaître le même phénomène, bien que de manière plus atténuée. L'autre région de fort chômage traditionnel couvre un grand Nord de la France, touchant les régions Basse-Normandie, Haute-Normandie, Picardie, Nord-Pas-de-Calais et Champagne-Ardenne.

Autocorrélation spatiale

Les indicateurs d'autocorrélation spatiale quantifient cette structuration régionale du chômage en France.

Soit les coordonnées géographiques X et Y, et Z la variable d'intérêt dont on étudie la structuration spatiale. On dispose d'un échantillon de n points de mesure. Le test en espace continu repose sur la construction d'une matrice de proximité W de dimension n x n dont chaque élément pour tout couple d'observation $i \neq j$ le coefficient d'influence w_{ij} dépend d'un rayon critique de recherche δ . Lorsque $d_{ij} \leq \delta$, alors $w_{ij} = \frac{a}{d_{ij}^m}$, où a et m sont des constantes positives qui donnent la forme de la fonction de décroissance de l'influence en fonction de la distance. Si $d_{ij} > \delta$, alors $w_{ij} = 0$.

Autocorrélation globale et corrélogramme

La somme des poids se note $S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij}$. Le coefficient global de Moran vaut pour une distance seuil δ donnée, en fonction de la matrice de proximité W associée,

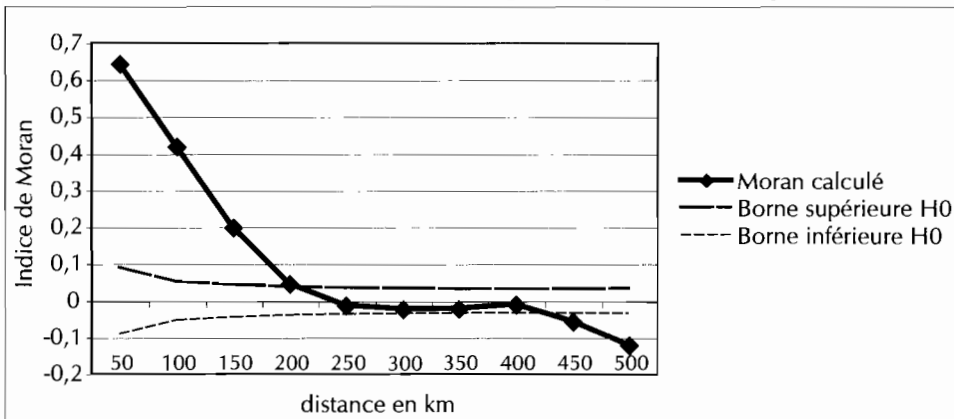
$$I_{\delta} = \frac{N}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$$

La loi que suit I sous hypothèse nulle d'indépendance suit asymptotiquement une loi normale dont Cliff et Ord ont déterminé l'espérance et la variance (1981).

On teste la nullité du coefficient par la méthode de l'écart réduit ou par des simulations de Monte-Carlo, simulant des tirages avec ou sans remise. Il est possible d'étendre le calcul du coefficient d'autocorrélation spatiale à différentes valeurs de distance critique. La représentation de la variation du I de Moran et des bornes de l'intervalle de confiance de l'hypothèse nulle d'indépendance par rapport à la distance critique du cercle d'influence permet de faire ressortir les composantes d'échelle dans la structuration spatiale de la variable d'intérêt.

Dans l'exemple du chômage en France, on a constitué des rayons de recherche de 50 à 500 km pour s'adapter à l'échelle géographique du jeu de données considéré. L'autocorrélation spatiale est fortement positive dans un rayon moyen de recherche inférieur à 150 km, ce qui définit des régions homogènes légèrement plus étendues que des régions administratives. Au-delà de 400 km de distance, les régions éloignées sont plus différentes entre elles. Entre les deux, les configurations sont variables selon les directions, et le coefficient de Moran tombe dans l'intervalle de confiance de l'hypothèse nulle.

Figure 2 - Corrélogramme taux de chômage 1999 par zone d'emploi



Autocorrélation locale

En 1995, Anselin a proposé de décomposer le coefficient de Moran en ses composantes locales. On calcule la variance corrigée en retirant l'observation i ,

$$S^2 = \frac{\sum_j z_j^2}{N-1} - \bar{z}^2$$

à un rayon critique de recherche fixé, soit la matrice des poids

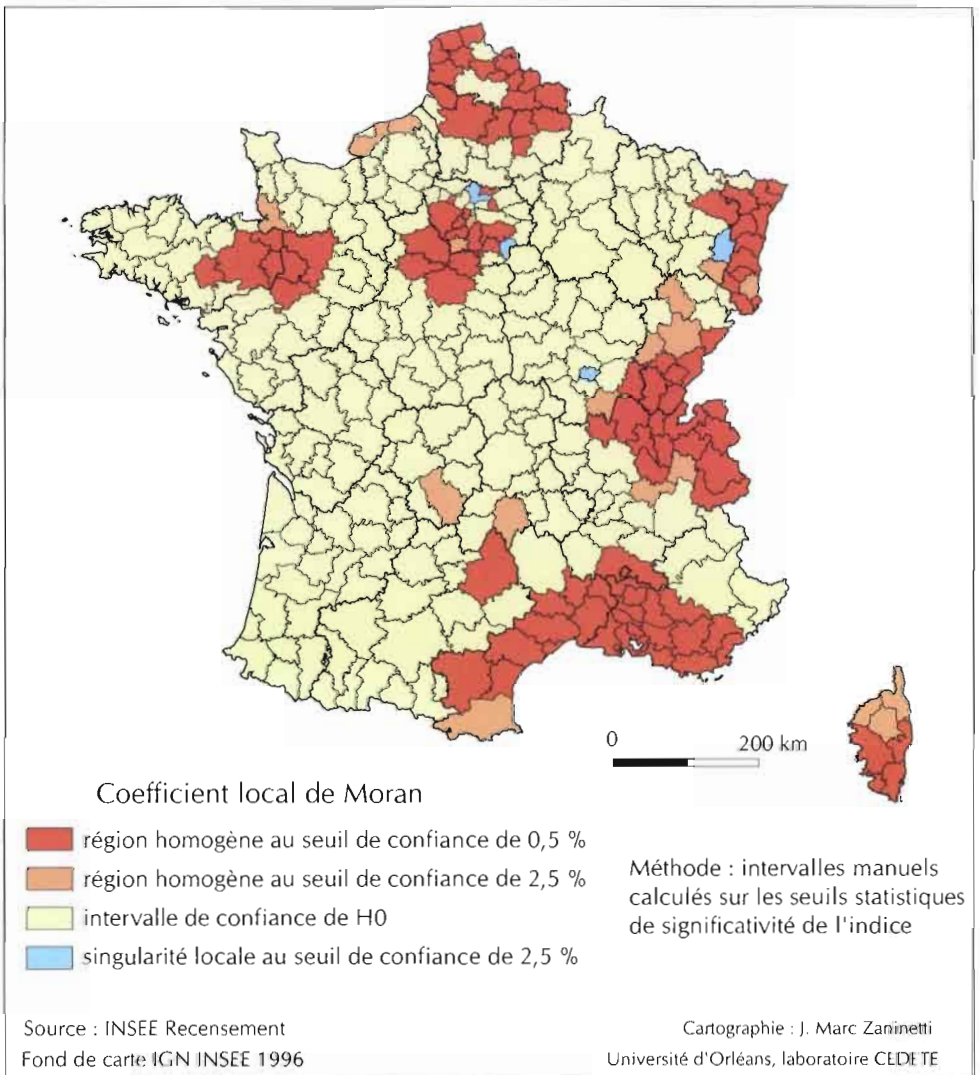
associée, le coefficient local vaut $I_i = \frac{z_i - \bar{z}}{S^2} \cdot \sum_j w_{ij} (z_j - \bar{z})$. D'une observation à

l'autre, le nombre total K de voisins pris en considération dans le calcul des coefficients locaux (couples de coefficient w_{ij} non nul) permet de calculer la relation entre le coef-

ficient global et ses composantes locales.
$$I = \frac{\sum I_i}{K}$$

Selon Anselin (1995), la loi suivie par les coefficients locaux est normale, mais sa variance dépend de la dimension de l'échantillon local. Toutefois, il existe une forte relation linéaire entre le coefficient local et la valeur du test de Student associé, ce qui permet de définir un seuil moyen de significativité par une fonction linéaire. Toutefois, la qualité de la relation dépend du choix de la distance Δ critique. Si celle-ci est trop petite, la variance théorique est instable et la fiabilité du coefficient local devient douteuse dans les zones de faible densité du semis de points de mesure. A contrario, choisir une distance trop grande donne une statistique trop lissée et peu discriminante.

Figure 3 - Coefficients locaux de Moran pour le taux de chômage en France en 1999



Dans l'exemple du chômage en France, on a choisi la distance critique de recherche de 100-km, qui permet de construire un indicateur local fondé sur 2233 paires d'observations. Le coefficient global de Moran est très significatif ($I=0,42$, t de Student = 20,5). Les coefficients locaux compris entre $-7,4$ et $+7,47$ tombent généralement dans l'intervalle de confiance de l'hypothèse nulle à 5 % de risque d'erreur, ce qui signifie que la différence entre les taux de chômage des zones d'emploi proches pourrait être produite au hasard. Les coefficients inférieurs à $-7,4$ identifient les singularités remarquables, bassins d'emploi très différents de leur environnement régional, et les coefficients supérieurs à $7,47$ identifient les régions homogènes.

La carte des coefficients locaux d'autocorrélation spatiale (fig. 3) complète celle du phénomène étudié et en facilite l'interprétation. Les grandes régions homogènes sont mises en évidence. Le Midi Méditerranéen, excepté la Côte d'Azur et le Nord-Pas-de-Calais et la Picardie ainsi que le pays de Caux forment les deux grandes régions homogènes de fort chômage en France. Les zones de fort chômage de l'Ouest Atlantique et du Centre de la France sont moins homogènes, ce qui indique l'influence de facteurs locaux.

À l'opposé, quatre régions homogènes de faible chômage ressortent. L'Alsace, un ensemble « genevois » allant du Jura à l'Ain et à la Savoie, l'Île-de-France ouest et sud étendue à la Beauce, à Chartres et à Orléans et l'Ouest intérieur dans l'Ille-et-Vilaine et la Mayenne.

Répartition des taux d'activité selon le sexe et l'âge

Comme le taux de chômage, les taux d'activité selon le sexe et l'âge sont nettement différenciés entre les régions françaises.

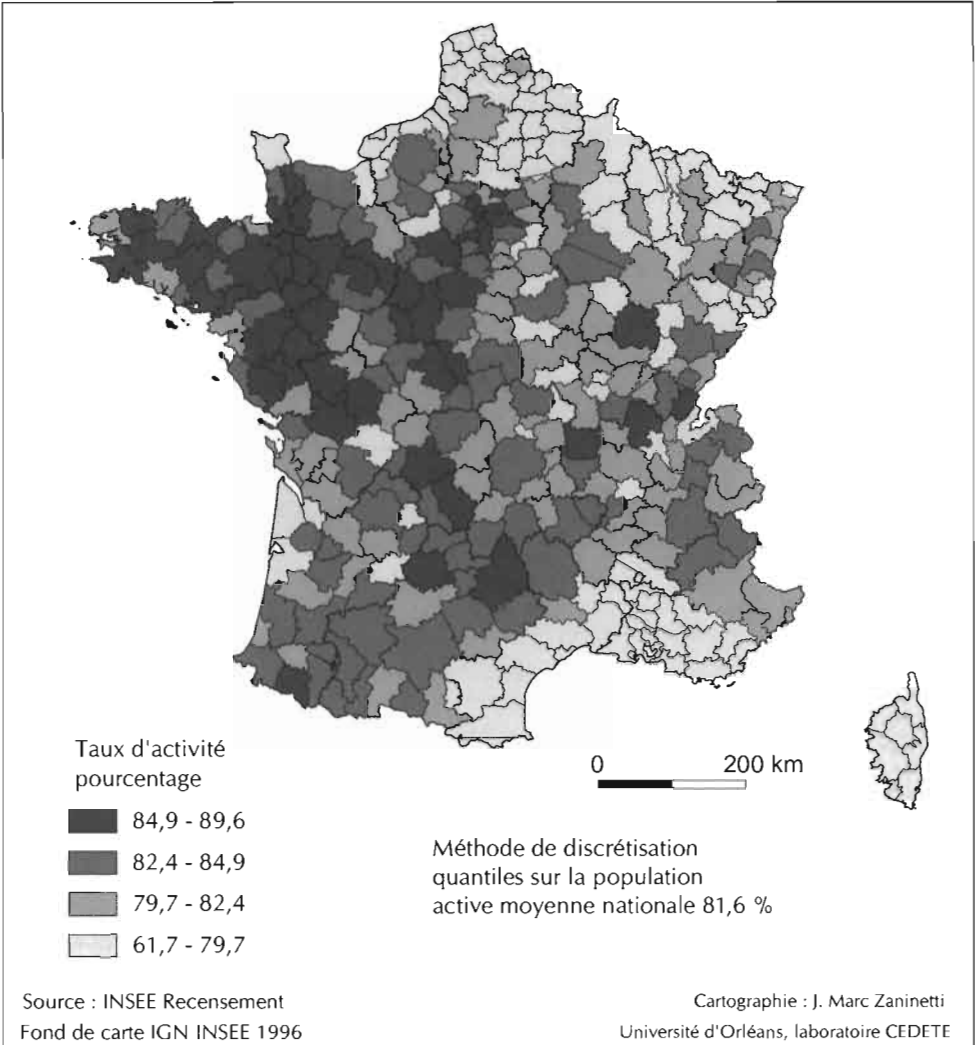
L'insertion des jeunes sur le marché du travail est uniformément faible en France. Le taux d'activité moyen des jeunes hommes est de 33 % et celui des jeunes femmes est de 27 %. Il est plus faible dans les principales zones d'emploi urbaines où se concentre la population des étudiants, et plus élevé dans les zones rurales. Les nuances régionales sont faibles.

Pour les classes d'âge de 25 à 49 ans, le taux d'activité des hommes dépasse 95 %, et celui des femmes approche les 82 %, ce qui est un niveau très élevé. L'activité masculine varie assez peu d'une région à l'autre, alors que le taux d'activité féminine est plus différencié (fig. 5). Il est particulièrement faible autour de la Méditerranée et dans le Nord-Est. Il est très élevé au contraire dans le Grand Ouest, en Île-de-France et en région Centre et dans l'ouest du Massif Central.

Un peu plus de 52 % des hommes âgés de 50 à 69 ans sont en activité. Le taux d'activité des femmes de 50 à 69 ans est plus faible, de l'ordre de 40 % au plan national. Ces taux sont assez inégalement répartis, avec deux pôles d'activité plus forte, l'Île-de-France et ses environs, et le Centre Est, en particulier autour de Genève. On peut expliquer cela par la différence de législation en France et en Suisse, où l'âge de la retraite est plus tardif. Pour les principales métropoles, le taux d'activité est entretenu par l'émigration des nouveaux retraités qui quittent ces régions urbaines au profit de

leur province d'origine ou des régions méridionales et littorales où ils ont acquis une résidence secondaire pendant leur vie active.

Figure 4 - Taux d'activité des femmes de 25 à 49 ans par zone d'emploi en 1999



Modèle de relation linéaire entre le taux de chômage et la pyramide de la population active

Le modèle de corrélation linéaire est construit pas à pas de façon ascendante. Le gain de qualité d'ajustement est minime lorsque l'on passe de 4 à 5 ou 6 variables indépendantes. Le meilleur modèle à quatre variables indépendantes est celui qui associe le taux de chômage au taux d'activité des hommes de 15 à 24 ans, des femmes de 25

à 49 ans, et des personnes des deux sexes de 50 à 69 ans. L'éviction des femmes de 15 à 24 ans et des hommes de 25 à 49 ans s'explique par le fait que ces variables ont une répartition plus uniforme que les autres.

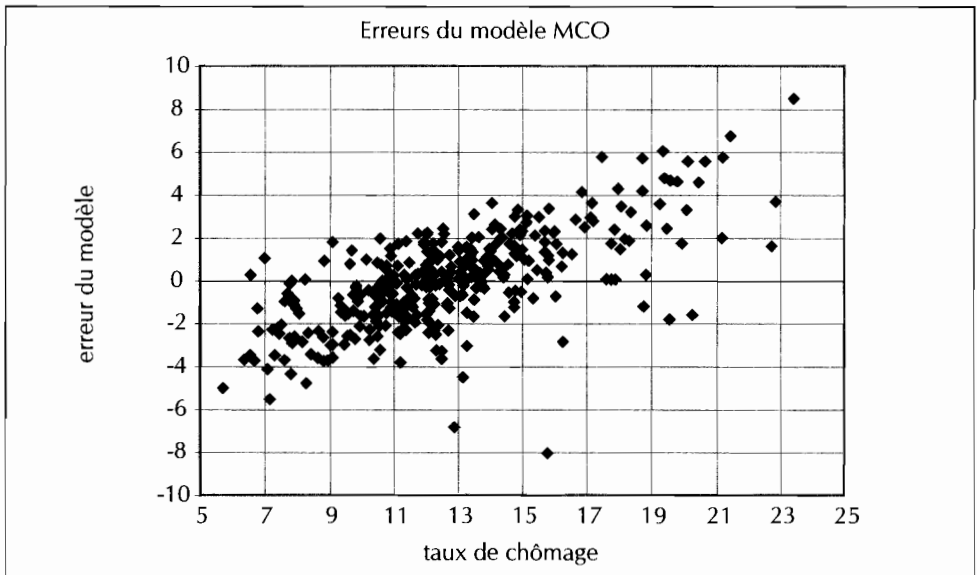
Le coefficient de corrélation multiple du modèle MCO global est de 0,74. Un peu plus de 54 % de la variance du taux de chômage est repris par la covariation avec les taux d'activité. Les régions où le taux de chômage est le plus fort sont également celles où le taux d'activité est le plus faible, en particulier les taux d'activité des femmes, des jeunes et des hommes de plus de 50 ans. Corrélation ne signifie pas causalité, mais si l'on devait imaginer une relation logique entre taux de chômage et taux d'activité, il n'irait pas dans le sens attendu, mais plutôt dans celui d'une influence du taux de chômage sur les taux d'activité. L'entrée des jeunes dans la vie active est particulièrement retardée dans les régions où le chômage est le plus fort, les femmes y sont plus découragées d'entrer sur le marché du travail et les travailleurs les plus âgés y sont plus volontiers poussés à prendre une retraite anticipée. Au contraire, dans les régions où le chômage est plus faible, comme dans le Grand Ouest, en région Centre, en Alsace et autour de Genève, les taux d'activité sont plus élevés pour toutes les catégories de population.

Ce modèle est-il efficace pour expliquer les disparités régionales de taux de chômage en France ? La covariation entre les deux phénomènes n'est certes pas négligeable, mais une grande part de la variance du taux de chômage reste sans rapport avec les taux d'activité. On peut évidemment ajouter davantage de variables indépendantes et améliorer mécaniquement le modèle. On pense à des variables qui ont un rapport connu avec le chômage, tel que le niveau de formation et de qualification, la part du secteur touristique dans l'activité, la proportion de migrants alternants qui trouvent à s'employer dans une autre zone d'emploi, celle des travailleurs frontaliers en particulier, ou encore l'ajustement de la pression sur le marché du travail par les migrations résidentielles. C'est une démarche classique, contre laquelle on peut toutefois élever certaines objections.

L'augmentation du nombre de variables indépendantes augmente les effets d'interaction à l'intérieur du modèle et rend difficile l'appréciation de la contribution propre à chaque caractère. De manière générale, la valeur « explicative » d'un modèle est d'autant plus grande que celui-ci est parcimonieux. Il existe un environnement économique et social en France au sein duquel le chômage est plus souvent une cause qu'un effet, avec des rétroactions nombreuses. Il est d'autant plus difficile de séparer les effets propres des différents caractères dans un modèle linéaire que celui-ci compte beaucoup de variables indépendantes. Enfin, il semble assez absurde de construire ce genre de modèles qui imite le raisonnement de l'économiste en restant attaché à des valeurs agrégées par zone d'emploi et à une mesure exhaustive. La question de l'activité et du chômage serait posée de manière plus pertinente avec un modèle économétrique sur variables qualitatives mesuré sur un échantillon national d'observations individuelles. Mais poser la question des causes ne traite pas notre question initiale : l'espace français constitue-t-il un marché du travail homogène ou bien existe-t-il une

organisation régionale de marchés régionaux fonctionnant selon des modalités diverses ? En fin de compte, la modélisation linéaire classique est inadéquate pour répondre à une telle question, car en calculant une relation moyenne unique, on suppose que la covariation entre les facteurs est stationnaire dans l'espace, ce qui réduit l'analyse spatiale aux résidus du modèle, quantité qui devrait être nulle par hypothèse et aléatoirement distribuée. Il y a là une faille du raisonnement que démontre l'autocorrélation spatiale des résidus.

Figure 5 - Répartition des résidus du modèle

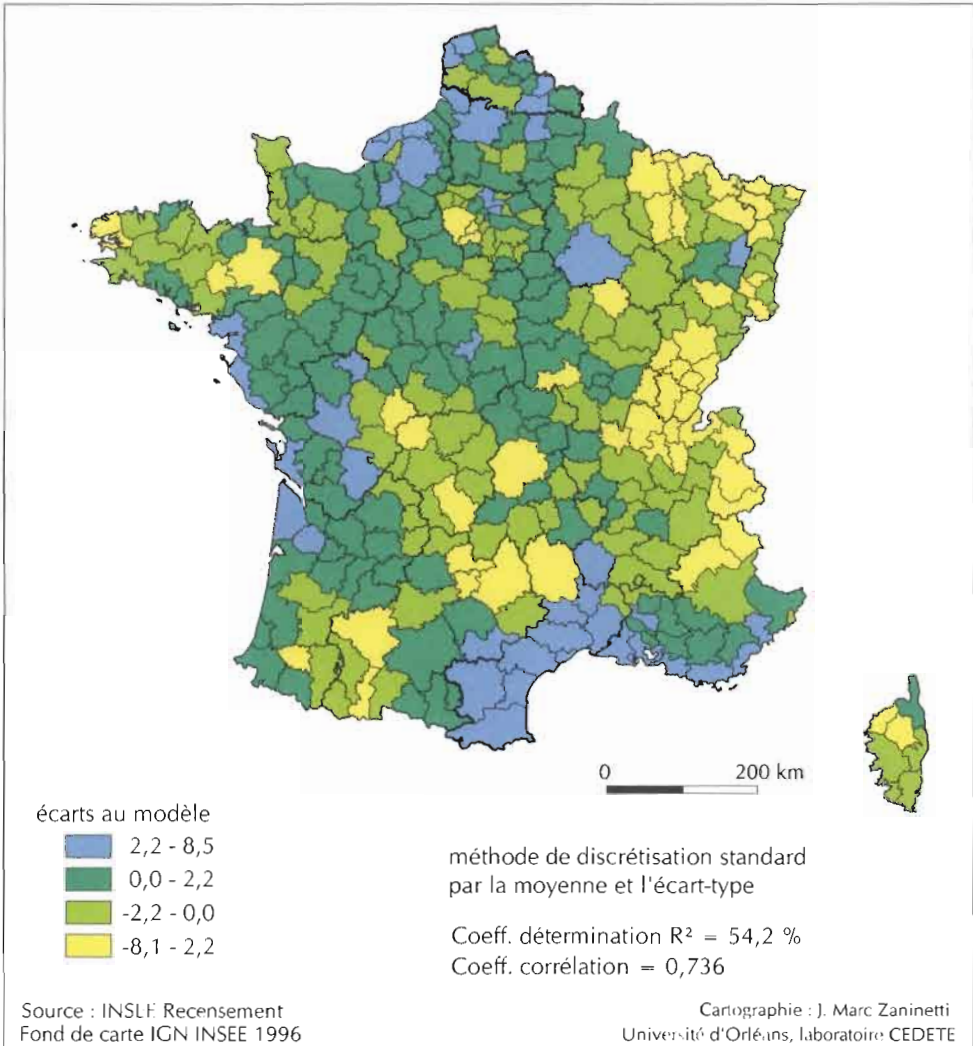


La théorie de la modélisation linéaire demande que les résidus soient de moyenne nulle, de répartition normale, homoscédastiques et indépendants. Dans l'exemple du rapport entre chômage et activité en France, les deux dernières conditions ne sont pas respectées. En dehors de quelques observations atypiques, on observe que les résidus suivent une relation linéaire croissante avec la variable dépendante. C'est ainsi que la moyenne des résidus n'est pas nulle pour toutes les parties du graphique ; elle est négative à gauche, positive à droite. La carte des résidus ressemble donc à celle du phénomène étudié. On interprète ceci en général comme le signe indubitable qu'il manque un ou plusieurs caractères « explicatifs » majeurs dans le modèle. De surcroît, les résidus ne sont pas indépendants.

Comme celle du taux de chômage, la carte des résidus montre des régions homogènes. Le modèle surestime les taux de chômage en Bretagne, Lorraine, Alsace, Franche-Comté, Rhône-Alpes à l'exception du département de la Loire, Limousin, Corse et de quelques autres ensembles sous-régionaux. Au contraire, le modèle sous-estime lourdement le chômage des régions méditerranéennes, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur, de l'Arc Atlantique de Saint-Nazaire à Bordeaux en passant par le Poitou-Charente, et des régions septentrionales, Haute-Normandie, Picardie,

Nord-Pas-de-Calais. D'autres erreurs localisées sont très importantes, comme à Saint-Denis en région parisienne par exemple.

Figure 6 - Résidus du modèle MCO entre chômage et taux d'activité



L'autocorrélation spatiale des résidus du modèle reste importante, même si elle est moins forte que celle des valeurs observées, elle est sensible jusque dans un rayon de 200 km. Cette dernière épreuve montre que la méthode classique de *modélisation a-spatiale* est peu satisfaisante.

C'est pour traiter ce type de problèmes que Brunson, Charlton et Fotheringham ont proposé d'appliquer un filtre géographique permettant de calculer des modèles locaux de relation.

Figure 7 - Corrélogramme des résidus du modèle

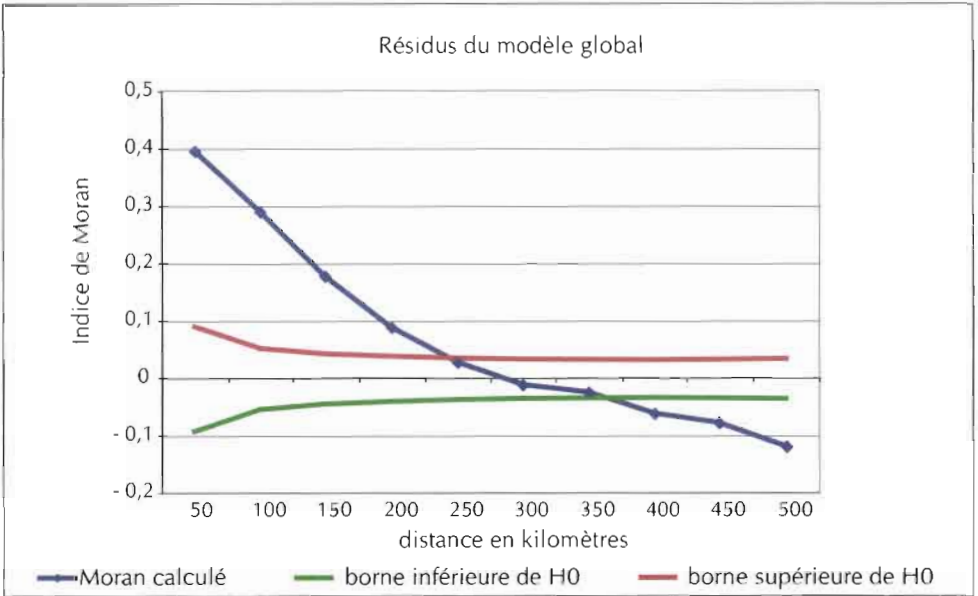
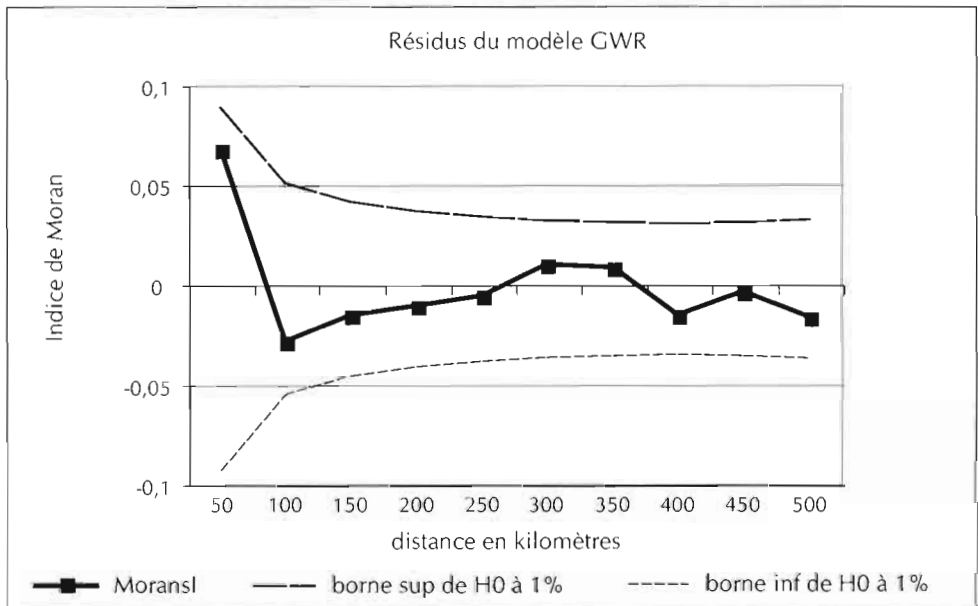


Figure 8 - Corrélogramme des résidus du modèle GWR



Modèle géographique pondéré de relation entre taux de chômage et taux d'activité selon le sexe et l'âge

On a réalisé un modèle GWR sur les mêmes variables que précédemment en définissant un filtre spatial flexible où les valeurs prévues pour chaque zone d'emploi dépendent des valeurs prises par les variables indépendantes dans les 36 zones d'emploi les plus proches. Le coefficient de détermination du modèle GWR est bien meilleur que celui du modèle MCO général, car il transfère une bonne partie des effets géographiques de la partie aléatoire à la partie déterministe du modèle. Le coefficient de corrélation multiple s'élève à 0,89. Plus de 79 % de la variance du taux de chômage est reprise par les prévisions du modèle. Les résidus sont donc beaucoup plus faibles et ne manifestent plus d'autocorrélation spatiale.

Si les erreurs du modèle sont indépendantes, elles ne sont toujours pas homoscédastiques. Il manque donc toujours des variables explicatives qui n'ont aucun rapport avec le taux d'activité de la population selon son sexe et son âge, mais le fait de régionaliser les estimations améliore la qualité descriptive d'un modèle simple à interpréter.

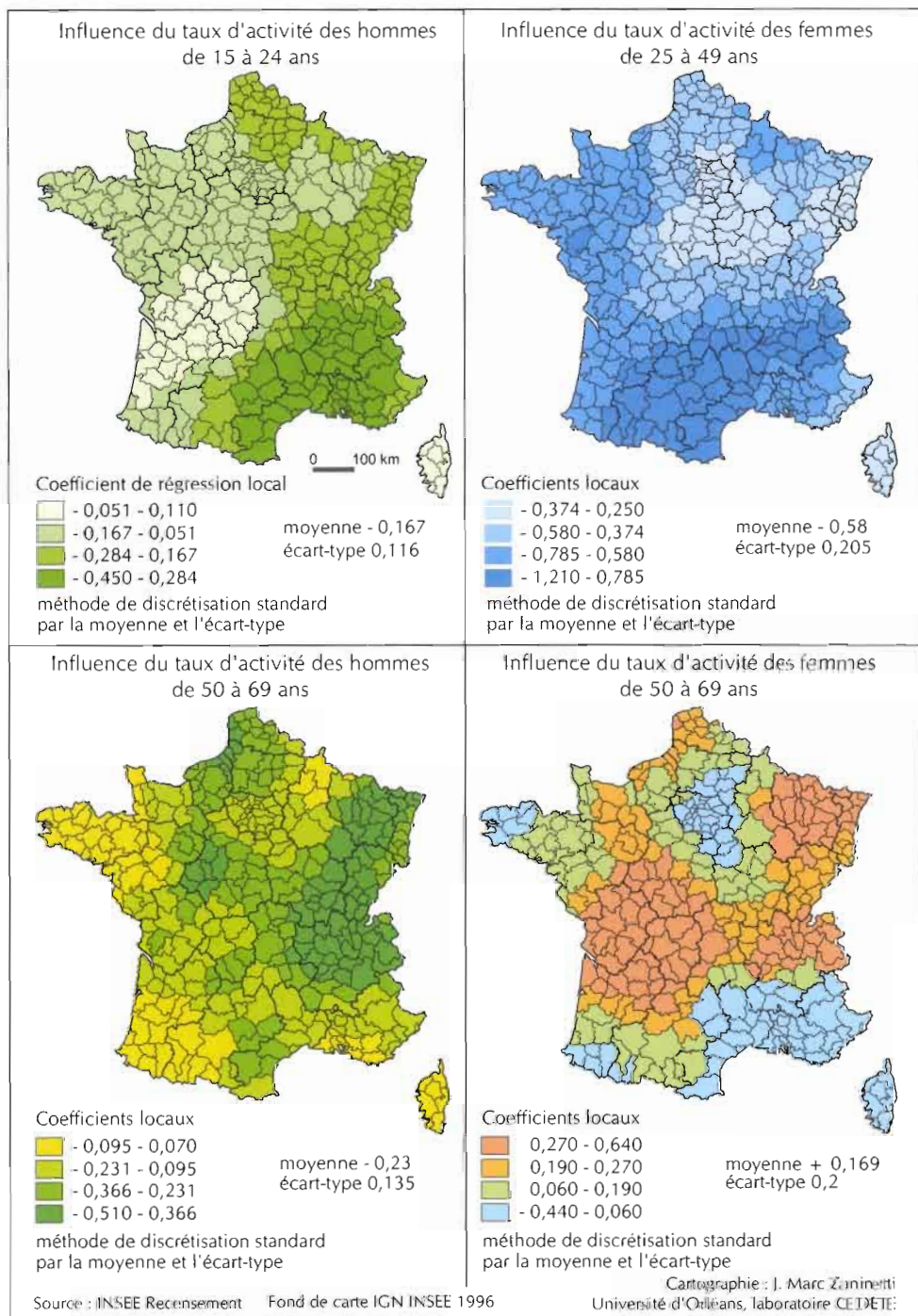
Un des apports les plus intéressants des modèles locaux est de produire des vecteurs de coefficients qui peuvent être représentés sur des cartes et interprétés comme des variables proprement géographiques. En fait le gain de qualité de la modélisation GWR par rapport à la modélisation linéaire classique ne consiste pas à renforcer le caractère « explicatif » du modèle, mais plutôt sa capacité à représenter la diversité des conditions régionales dans lesquelles s'effectuent les relations que l'on modélise. Les cartes de coefficients montrent donc le sens de la covariation entre le caractère endogène (ici le taux de chômage) et chacun des caractères indépendants. Bien que les coefficients soient lissés, la régionalisation qui s'en dégage donne un aperçu intéressant sur l'organisation des territoires. Néanmoins, leur interprétation est délicate.

Dans l'ensemble, un fort taux de chômage est associé à un plus faible taux d'activité des jeunes, des femmes et des actifs de 50 ans et plus, mais ces relations sont assez différentes selon les régions.

C'est l'activité féminine qui tient lieu de « variable d'ajustement » face à l'importance plus ou moins forte du chômage dans l'Ouest Atlantique. Les régions du Midi sont marquées par des ajustements très sensibles pour les femmes, et les jeunes, ce qui en fait le marché du travail le plus discriminant. Les régions du Nord et de l'Est sont caractérisées par un ajustement sensible du taux d'activité des hommes de 50 ans et plus. Cela peut s'expliquer par les restructurations industrielles qui se sont traduites par d'importantes mises en préretraite. Le niveau du chômage est plus faiblement lié aux taux d'activité par sexe et âge dans le Bassin parisien.

La variation spatiale des coefficients du modèle est une information nouvelle qui ne dépend pas du niveau respectif de la variable endogène et de la variable indépendante. Considérons l'exemple des coefficients locaux associés au taux d'activité des femmes de 25 à 49 ans (fig. 10), qui est la variable la plus discriminante du modèle. Le

Figure 9 - Relation entre les taux d'activité selon le sexe et l'âge et le taux de chômage



coefficient est très négatif en Midi-Pyrénées, en Languedoc-Roussillon et en Provence, qui connaissent à la fois un fort chômage (fig. 1) et un faible taux d'activité féminine (fig. 6) tandis que le coefficient est aussi très négatif dans le Grand Ouest, où l'intensité de l'activité féminine est forte alors que le chômage est faible. Le modèle GWR permet aussi de décomposer les effets d'interaction entre les caractères indépendants, et de dégager une information nouvelle. On peut interpréter ce coefficient comme une mesure de la sensibilité du taux d'activité féminin à l'intensité du chômage. C'est la manifestation de ce que l'on appelle le « chômage caché ». De nombreuses femmes sont en effet découragées de rechercher un emploi lorsque le chômage est fort. Ce que le modèle local nous apprend, c'est que ce comportement est très sensible dans l'Ouest et dans le Midi, mais l'est beaucoup moins dans le Bassin parisien. Un modèle local permet encore d'appréhender de manière assez fine une relation qui peut être contradictoire entre différentes régions. C'est le cas par exemple du coefficient reliant le taux de chômage au taux d'activité des femmes de 50 ans et plus (fig. 9). La relation est positive dans certaines parties du territoire, le Centre Ouest, l'Est et le Centre Est, mais elle est négative dans le Midi Méditerranéen en Île-de-France. Cette souplesse est une des principales raisons du gain de qualité d'ajustement du modèle GWR sur le modèle global MCO classique.

De la même manière que les autres coefficients du modèle, la constante d'ajustement varie d'une zone d'emploi à l'autre dans un modèle GWR. Son niveau est très lié à la qualité de l'ajustement. En effet, l'efficacité descriptive d'un modèle d'ajustement local n'est pas uniforme. Elle est maximale dans les régions où les variables endogènes et indépendantes sont relativement homogènes. L'ajustement est moins efficace, là où les conditions locales sont très contrastées. La structure des données elles-mêmes peut en être la cause. C'est en particulier le cas là où les zones d'emploi sont petites et un peu artificielles comme en Île-de-France.

Place du SIG dans l'analyse spatiale quantitative

Avec l'élaboration d'indicateurs locaux d'association spatiale (Anselin, Getis et Ord 1995) et la modélisation locale qui permet de réintroduire la diversité des conditions locales et des interactions dans la modélisation (Cressie, 1991 ; Brunsdon Charlton et Fotheringham, 1996 et 2002), l'analyse spatiale devient plus « réaliste », et partant plus « applicable ». Considérant que la variabilité est la règle, la modélisation ne recherche plus tant des lois générales que des formes locales d'association entre les phénomènes observés qui peuvent s'expliquer par une loi de probabilité ou qui en divergent de manière significative. L'un des objectifs de la modélisation locale est de développer des modèles parcimonieux mais efficaces, ce qui doit faciliter l'interprétation théorique des relations empiriques que l'on modélise, tout en intégrant explicitement la dimension spatiale dans l'explication.

Ce changement n'aurait sans doute pas été possible sans l'informatique en général et les SIG en particulier. Ces logiciels ont une place marginale au plan théorique, mais ils sont indispensables au plan pratique. En effet, ils ont permis de mieux prendre en compte la spécificité de l'information spatiale. Au-delà des SIG, les ordinateurs sont indispensa-

bles au développement des nouvelles techniques de l'analyse spatiale, qui contrairement à leurs aînées, reposent moins sur la formalisation, et davantage sur le calcul.

Dans les nouvelles approches développées en analyse spatiale, le SIG occupe une position périphérique, en amont et en aval de l'analyse spatiale. Il intervient dans une phase préalable de visualisation des données au travers de la cartographie thématique. Il permet aussi de renseigner les attributs spatiaux des observations (topologie, coordonnées...). Il permet éventuellement de retraiter une information aréolaire pour corriger les effets de forme et de surface au moyen de grilles de carroyage. En analyse spatiale, on a longtemps fait la distinction entre l'analyse de semis de points et celle des données aréolaires. Avec les SIG, cette distinction commence à se brouiller. Les données zonales peuvent être traitées comme des données ponctuelles en ramenant les attributs aux coordonnées du centroïde du polygone, comme dans le cas des modèles GWR et de l'autocorrélation spatiale généralisée. Réciproquement, un jeu de données ponctuelles peut être converti en surface de densité « de noyau » (Kernel³), même s'il n'est accompagné d'aucune mesure quantitative.

Avec le développement des indicateurs locaux d'association spatiale et des modèles locaux comme la régression GWR que nous venons de présenter, le SIG intervient aussi en aval de l'analyse spatiale. Par ses capacités de représentation cartographique rapide, il permet de visualiser efficacement les indicateurs produits par les analyses locales, et de leur apporter une interprétation géographique. Toutefois, il est souvent nécessaire de coupler le SIG avec d'autres outils pour approfondir l'analyse. En particulier, l'analyse exploratoire de données multivariées nécessite le recours à des logiciels d'analyse des données statistiques. Bien que l'on ne puisse prédire les évolutions à venir dans le domaine de l'analyse spatiale, on peut d'ores et déjà considérer que le développement de la micro-informatique et des SIG a apporté une stimulation considérable au développement de la recherche en analyse spatiale, en consolidant sa vocation fondamentalement appliquée et en rendant son utilisation moins ésotérique. La méthodologie de notre discipline s'en trouve renforcée et on peut espérer que la vulgarisation de ces méthodes finira de combler le fossé creusé dans les années soixante entre les tenants du réalisme de la géographie classique et les partisans de la rigueur de l'analyse spatiale.

Bibliographie

Publications relatives au thème abordé

DJIDER Z. *Femmes et hommes : regards sur la parité*. Paris ; INSEE : 2e édition mars 2002. 131 p.

DUMONT G.F. *Géographie de la France chap.2 II_B Population et société ; la population active et l'emploi*. Paris ; Ellipses coll. Universités Géographie : 2002. p. 56-75.

INED. *Populations en chiffres*. INED : available on Internet

³ Kernel mot anglais désignant une graine ou un noyau. Les nouvelles méthodes d'interpolation par des fonctions « kernel » sont un autre développement important de l'analyse spatiale. Le modèle GWR utilise une telle fonction pour son estimation de son filtre spatial W_i .

URL <<http://www.ined.fr/population-en-chiffres/pays-developpees/index.htm>>

INSEE (Collectif). *La France et ses régions*. Paris ; INSEE : 5^e édition 2002. p. 167, 168, 226 et 227.

NOIN D. *La population de la France chap.8 La population active*. Paris ; Armand Colin coll. U : 6^e édition 2002. p. 111-132.

ÉCONOMIE ET STATISTIQUE (Varii Auctores). *Marchés du travail : comparaisons internationales*. Paris ; INSEE : n° 332-333 2000. 184 p..

OCDE (Collectif). *Labour Force Statistics. Statistiques de la population active 1981 – 2001-2002*. Paris ; OCDE : Août 2002. 440 p.

VIMONT C. *Pays développés, les nouvelles tendances de l'activité et de l'emploi*. Population et Avenir n 658: mai-juin 2002. p. 4-6.

ZANINETTI J.M. *Typologie des régions de l'Union Européenne selon la pyramide des âges de la population active en 1996*. Cahiers Géomatiques d'Orléans n 1: décembre 2002. p. 3-8.

Publications sur l'autocorrélation spatiale

ANSELIN L. *Local Indicators of Spatial Association LISA*. Geographical Analysis, 27 (2), 1995. pp. 93-115.

CLIFF A.D. ORD J.K. *Spatial Autocorrelation*, London: Pion 1973.

CLIFF A.D. ORD J.K. *Spatial Processes : models and applications*, London: Pion 1981. 262 p.

CRESSIE N. *Statistics for Spatial Data*. New York: Wiley 1991, revised edition 1993. 900 p.

GETIS A. ORD J.K. *Local Spatial Autocorrelation Statistics : Distributional issues and an application*. Geographical Analysis, 27 (2), 1995. pp. 287-306.

SAWADA M. *Global Spatial Autocorrelation Indices : Moran's I, Geary's C and the General Cross-Product Statistic*. 1998. available on internet at URL <http://www.uottawa.ca/academic/arts/geographie/lpcweb/newlook/publs_and_posters/reports/moransi/moran.htm#top>

SAWADA M. *ROOKCASE: An Excel 97/2000 Visual Basic (VB) Add-in for Exploring Global and Local Spatial Autocorrelation*. Bulletin of the Ecological Society of America, 80(4): 1999. p. 231-234.

Publications sur les modèles locaux GWR

BRUNSDON C. CHARLTON M.E. FOTHERINGHAM A.S. *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*, Chichester: Wiley 2002. 269 p.

BRUNSDON C. CHARLTON M.E. FOTHERINGHAM A.S. *Quantitative Geography*. London: Sage : 2000. 270 p.

BRUNSDON C. CHARLTON M.E. FOTHERINGHAM A.S. *Geographically weighted regression - modelling spatial non- stationarity*. Journal of the Royal Statistical Society, Series D-The Statistician, 47(3), 1998. p. 431-443.

BRUNSDON C. CHARLTON M.E. FOTHERINGHAM A.S. *Measuring Spatial Variations in Relationships with Geographically Weighted Regression*. Chap. 4 in *Recent Developments in Spatial Analysis, Spatial Statistics, Behavioral Modelling and Neurocomputing* M.M. FISCHER AND A. GETIS (eds.), London ; Springer-Verlag : 1998.

BRUNSDON C. CHARLTON M.E. FOTHERINGHAM A.S. *Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity*. Geographical Analysis, 28(4), 1996. p. 281-298.

Citations

La présente étude a été réalisée à l'aide des logiciels suivants :

Première partie : autocorrélation spatiale. Rookcase v.0.9 de M. Sadawa université de Toronto (1999)

Deuxième partie : choix du meilleur modèle MCO. SPAD v. 5.0 du CISIA-CERESTA www.cisia.com

Modèle local GWR. GWR 2.0.0.5 de MM. Brunsdon et Fotheringham, université de Newcastle (2002).

La cartographie a été réalisée sous Mapinfo v.6.0®.

La difficile intégration des mobilités humaines dans les SIG : comment rendre l'espace nomade ?

Eric LECLERC, Centre de Sciences humaines, New Delhi, India
E-mail : eric.leclerc@csh-delhi.com

Résumé : Les Systèmes d'informations géographiques intègrent dans leurs usages professionnels, les déplacements de mobiles (animaux ou non-humains) grâce aux fonctions de positionnement par satellite en temps réel. Malgré la gestion des flottes de camions ou l'analyse des déplacements des animaux par ces méthodes, le suivi des populations humaines n'est pas encore à l'ordre du jour. L'analyse de la dimension spatio-temporelle des activités humaines demeure embryonnaire comme le montre la difficile intégration des nomades dans la construction d'un S.I.G. sur la Mauritanie ou encore une étude des mobilités quotidiennes des habitants d'une grande métropole indienne, Hyderabad. À travers ces deux exemples, nous montrerons que les obstacles sont d'ordre technique (peu d'outils disponibles, difficulté de collection de l'information) mais aussi théorique (comment traduire les dynamiques spatiales ? comment intégrer les dimensions non-spatiales des objets étudiés ?)

Mots clés : Mobilité, Dynamique spatiale, Espace-temps, Nomade.

The difficult integration of human mobilities in the GIS : how to make space nomadic ?

Abstract: Geographical Information Systems integrate, in their professional uses, displacements of mobiles (animal or not-human) with real time satellite positioning functions. Even though it is possible to manage truck fleets or to analyze animal mobility using these methods, the monitoring of human populations is not yet an option. The analysis of the space-time dimension in human activities remains embryonic, as it is shown by the difficult integration of nomad displacements in a G.I.S. in Mauritania, or by the complexity of daily human mobility in a large indian metropolis such as Hyderabad. Through these two examples, we show that the obstacles are technical (few tools are available, difficulty in data collection) but also theoretical (how should spatial dynamics be translated ? how should the non spatial dimensions of the study objects be integrated ?)

Key words: Mobility, Space Dynamics, Space time, Nomad.

Introduction

À l'heure où les SIG permettent de suivre les déplacements de mobiles (animaux ou non-humains) grâce aux fonctions de positionnement par satellite en temps réel, le suivi des populations humaines est loin d'être réalisé. Les outils et méthodes mises en place pour la gestion des flottes de camions ou l'analyse des déplacements des animaux n'ont pas encore d'équivalent pour l'homme. On pourrait bien sur objecter qu'il s'agit d'un problème extérieur au dispositif technique que représente un système d'information

géographique, ce qui a été réalisé pour les autres types de mobiles ne demande qu'à être transféré aux mobilités humaines. Mais l'argument n'est pas recevable car le suivi de la mobilité individuelle des hommes pose des problèmes éthiques particuliers. Cet exemple nous permet donc de relier la technique des Systèmes d'information géographiques avec ses usages et nous oblige à penser les Systèmes d'information géographiques de façon indissociable de la réalité sociale et économique qui les a engendré. Or il ne s'agit que d'outils au service d'un but social et politique, la gestion de l'espace.

Considérations générales et contraintes

Des questions d'éthique

Si l'on tente d'envisager les possibilités techniques de connaissances des mobilités humaines, on se heurte vite à des problèmes d'éthique. Pour étudier certaines populations animales menacées on a eu recours à la technique du collier électronique dont on suit les mouvements grâce à des signaux récupérés par l'intermédiaire de satellites. On peut difficilement envisager du point de vue des libertés individuelles de transférer cette technique à l'homme. Le problème est bien alors d'ordre politique et social.

Actuellement cette technique rebaptisée « bracelet électronique » pour l'homme, est utilisée comme une alternative à l'emprisonnement. Les Etats-Unis ont été les premiers à en développer l'usage en 1983. Depuis le milieu des années 90, cette innovation a été importée en Europe au Royaume-Uni et aux Pays-Bas. En France, le principe a été voté en décembre 1997, mais il a fallu attendre 3 ans pour que les premières expériences voient le jour. Il s'agit d'un bracelet qui émet un signal électronique toutes les 30 secondes, avec une portée de 50 à 200 mètres par rapport au boîtier de réception implanté dans le lieu d'assignation (domicile ou lieu de travail). Les raisons d'utilisation sont d'ordre économique, diminution par 3 du coût d'emprisonnement, et d'ordre conjoncturel, limiter la sur-population carcérale. Ceux qui seront équipés d'un bracelet électronique seront nos concitoyens privés de liberté pour trouble à l'ordre social. Depuis, une extension de cette technique est envisagée à Murakami à 300 kilomètres de Tokyo, auprès de tous les écoliers de cette ville¹. Il s'agit pour les parents de connaître à tout instant où se trouvent leurs enfants. Destiné aux délinquants ou aux mineurs, le bracelet électronique qui autorise le suivi individuel de la mobilité apparaît comme une nouvelle technique pour « surveiller et punir » (Foucault, 1975). Voilà qui augure mal d'une diffusion à grande échelle.

Des solutions légères mais insuffisantes

Il existe des solutions plus légères pour connaître nos déplacements. Nos moyens de paiements électroniques, cartes bancaires, télépéages permettent de suivre certains de nos mouvements quotidiens. Mais ils ne nous renseignent encore que bien imparfaitement sur nos mobilités. La carte bancaire n'offre une information que si notre

¹ Article de Philippe Pons dans le Monde du 08/10/2003.

déplacement implique une transaction monétaire. Ces informations qui nourrissent les activités du géomarketing réduisent notre vie à une somme d'activités marchandes bien loin d'en refléter la richesse. Une transaction indique le lieu, l'heure pour une position du porteur de la carte. Mais est-il accompagné ?, Qu'a-t-il fait avant ? Que fera-t-il après ? Quel trajet emprunte-t-il ? Sans compter évidemment, toutes les transactions en numéraires et les multiples actions qui ne donnent lieu à aucune transaction.

Les téléphones portables offrent également un moyen de suivi des mobilités, avec le Mobile Positioning System. Utilisé par la justice dans le cadre de délit (meurtre du préfet Erignac en Corse par exemple), l'usage de ce système est en train de s'étendre à la vie courante. Au Royaume-Uni, les utilisateurs de téléphone portable peuvent s'abonner au service Zagme qui vous alerte lorsque vous passez à proximité d'une boutique correspondant à vos centres d'intérêt². La société Ericsson met au point un système associant vidéo et géolocalisation. Il permet de connecter le téléphone de l'utilisateur sur le réseau des caméras de vidéo-surveillance d'une ville, afin d'identifier des itinéraires non encombrés. Avec le perfectionnement des outils de communication ou de transaction se pose là encore le problème de la défense des libertés individuelles : jusqu'où sommes nous prêts à être traqués ?

Des limites difficiles à surmonter

Cette absence d'information sur les mobilités individuelles se traduit par une faible prise en compte de ces phénomènes dans les Systèmes d'Informations Géographiques. La base de l'information sur les hommes a beaucoup moins évolué que la mesure indirecte de ses activités (consommation d'électricité, flux téléphoniques, déplacements ferroviaires). Peu de Systèmes d'Informations Géographiques disposent d'une gestion spatio-temporelle car l'essentiel de l'information humaine à gérer est statique et demeure du ressort de l'Etat (recensement, collecte de l'impôt, sécurité sociale), or le respect de la vie privée interdit la diffusion de ces informations à l'échelle individuelle.

Ce déficit influe également sur des problématiques qui ne concernent pas directement les mobilités humaines, mais en sont dépendantes. Prenons l'exemple des études sur les risques encourus par les populations qu'ils soient naturels ou industriels. L'analyse des risques distingue l'aléa qui correspond à la probabilité d'occurrence d'un phénomène et la vulnérabilité d'un système qui évalue sa capacité à surmonter une crise (Dauphiné, 2001). Ce second volet de la géographie des risques, l'étude de la vulnérabilité consiste en premier lieu à mesurer les effets d'un événement (explosion, accident de transport pour une matière dangereuse, inondation) sur les biens et les populations environnantes. Pour ces dernières, on distingue la vulnérabilité individuelle (« probabilité qu'une personne demeurant 24 h sur 24 en un lieu non protégé, proche de l'activité industrielle, soit tuée ») de la vulnérabilité sociale (« probabilité qu'un groupe de N personnes soit tué par un accident majeur lié à l'activité industrielle considérée »).

² Article de Frank Mazoyer, dans le Monde Diplomatique, août 2001, p17, <http://www.monde-diplomatique.fr/2001/08/MAZOYER/15444>.

La vulnérabilité individuelle dépend de la distance où se produit l'aléa, mais par définition, on considère l'individu comme immobile. La vulnérabilité sociale est mesurée en fonction de la densité et de la répartition de la population. Mais l'heure à laquelle intervient l'événement est essentielle pour en évaluer l'impact. S'il a lieu en soirée ou de nuit, on peut considérer que la population concernée est la population résidente (celle décrite par les bases de données courantes). Mais si l'événement a lieu en journée, alors il faut connaître la localisation des résidents au lieu de travail, des enfants au lieu de scolarisation ou encore la fréquentation d'un centre commercial situé dans le périmètre de l'aléa par une clientèle venue de l'extérieur. Il faut intégrer dans le Système d'Information Géographique la mobilité des populations au cours de la journée sinon la mesure du risque, et par voie de conséquence la gestion de la crise s'appuie sur une donnée incomplète, les résidents.

On peut dès lors se demander si dans l'approche des sociétés humaines, les Systèmes d'information géographiques ont dépassé le paradigme de la carte ? Celle-ci propose une vision synoptique du monde autorisant une mise en ordre et à distance de ce dernier afin d'agir sur celui-ci. Cette action peut être :

- patrimoniale, inscrire dans la pierre les limites cadastrales de terrain pour transmettre aux générations futures un état des rapports de forces sociaux à un instant donné (pétroglyphe de Bedolina³),
- immédiate, prendre une décision sur le cap ou la route à emprunter ;
- prospective, proposer un aménagement et permettre le dialogue des acteurs en matérialisant un projet spatial.

Mais les conditions de production de la carte correspondent à un état des lieux arrêté au moment de son élaboration, ce qui la classe dans les approches synchroniques de l'espace. Les Systèmes d'information géographiques offrent par contre, la possibilité de mise à jour en temps réel des informations, ce qui théoriquement permet en plus le traitement de la diachronie. Cependant le déficit d'information sur les mobilités humaines, restreint cette spécificité des SIG qui restent donc tributaires de ces limites pour traiter l'espace des hommes, nous maintenant dans une vision synchronique.

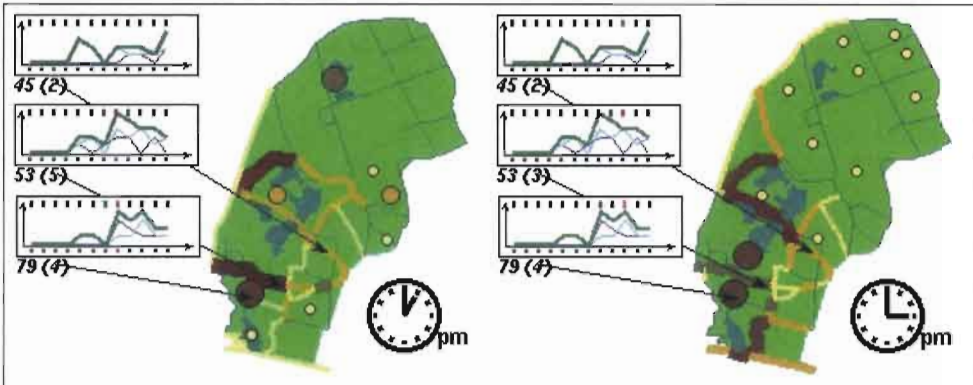
Quelques tentatives d'application récentes

Peu d'outils offrent à notre connaissance des possibilités de gestion des mobilités humaines, bien qu'il s'agisse à l'heure actuelle d'un domaine en plein développement. Une tentative a abouti à la production du logiciel *CDV-TS* à l'Université de Leicester (GB) autour de Jason Dykes (Dykes, 1999). Cet outil combine visualisation dynamique et approche spatiale (*Cartographic Data Visualizer for Time-Space data*) pour explorer les relations entre espace et temps. Il s'agissait de représenter des informations spatio-temporelles sur la fréquentation d'un parc allemand (fig. 1).

Sur cette carte dynamique, on peut observer la localisation des touristes dans le parc (point proportionnel) et dans les allées (ligne proportionnelle) à différentes heures

³ Il s'agit de l'une des premières cartes de l'humanité, gravée sur les parois d'une grotte en Italie du nord, pour une description détaillée (Jacob C., 1992, pp 41-48 ou Harley, J. B. Woodward, David, 199x, Vol , T.

Figure 1 - CDV-TS



de la journée. En sélectionnant l'un de ces éléments, l'outil peut générer un graphique (en haut à gauche) qui montre la fréquentation en ce lieu pour toutes les heures de la journée (ligne verte), éventuellement selon les caractéristiques des variables, ici le genre (ligne bleue les hommes, ligne violette les femmes). La graduation en rouge indique l'heure à laquelle la carte correspond, information que l'on retrouve aussi sur l'horloge en bas à droite. L'outil génère ainsi des cartes où l'on peut suivre le comportement de groupes spécifiques sur des durées de temps variables (Dykes, 1995).

Cette application a été utilisée récemment en France par Sonia Chardonnel du Laboratoire TEO de l'Université de Grenoble (Chardonnel and Knaap van der, 2002), pour l'étude des flux touristiques dans un parc naturel des Alpes du Nord. Dans ces deux exemples, il faut souligner : 1 - qu'il s'agit d'espaces clos et limités où l'on peut donc envisager plus facilement des techniques de comptage. Ainsi, dans le cas français, il n'y a que des mouvements pédestres et selon des parcours limités (sentiers de montagne). 2 - Que les résultats proposés portent sur des totalisations d'individus et non sur la gestion d'individus en mouvement. Cependant, l'outil permet bien les combinaisons entre variables attributaires du système d'information et le temps. À l'aide de ces quelques exemples, il semble que la faiblesse de la source d'information limite le développement d'outils spécifiques pour étudier à l'aide de SIG les mobilités humaines, il reste des pans entiers de recherche à mener dans ces domaines.

Deux études de cas en milieu rural et urbain

Les études de cas présentés ont été développés dans le cadre de deux programmes de recherche réalisés dans des aires géographiques éloignées et portant sur des problématiques différentes : un atlas pour la planification du développement de la Mauritanie et une étude des mobilités intra-urbaines dans une grande métropole de l'Inde méridionale, Hyderabad (6 millions d'habitants). Dans ces deux cas, nous nous sommes heurtés à des difficultés similaires pour intégrer les mobilités humaines dans un SIG ;

les problèmes à résoudre étant de trois ordres : la connaissance des mouvements, le traitement des mouvements et la représentation des mouvements.

Les déplacements des nomades en Mauritanie

Dans cette étude de cas, la première difficulté à laquelle on se heurte pour intégrer les mobilités humaines dans un SIG relève de la connaissance des mouvements des populations concernées même s'il s'agit de mobilités collectives. Afin d'élaborer un atlas pour la planification du développement en Mauritanie, nous devons intégrer les populations nomades qui constituaient encore 33% de la population en 1977 (*Atlas de Mauritanie, Migrations et gestion du territoire*, 1999). En Mauritanie comme ailleurs, la seule source exhaustive d'information sur les populations demeure le recensement de la population. Par définition, il s'agit d'une photographie à un instant donné, réalisée dans le minimum de temps possible pour que le décompte ne soit pas perturbé par le mouvement naturel de la population et les déplacements : il faut éviter les double-comptes. Or les populations nomades sont les plus mal prises en compte par cet outil de gestion du territoire qu'est le recensement. Il faut noter d'ailleurs que carte et recensement ont connu des développements parallèles car ils répondent tous deux à un même objectif de contrôle territorial par l'État.

Le premier élément de difficulté réside dans la définition du nomade. En Mauritanie est considérée comme sédentaire, toute personne vivant au moins six mois dans un village permanent. Un sédentaire peut donc être mobile pendant un peu moins de la moitié de l'année sans perdre son statut. De plus un village est qualifié de permanent s'il compte au moins une habitation en dur. Notre sédentaire peut donc habiter une tente ou un habitat temporaire comme l'immense majorité de ses voisins, à condition que ce regroupement soit établi autour d'une maison en dur.

Une telle définition de la population nomade sous-estime leur nombre mais aussi leur localisation ce qui constitue la deuxième difficulté. Pour dénombrer ces populations mobiles, les agents recenseurs leur assignent une position géographique unique souvent de piètre intérêt. Il peut s'agir d'une localisation géographique remarquable comme un puits, ou d'une localisation socio-administrative par rattachement à un membre de tribu ayant une résidence fixe. Quelque soit cette localisation, elle ne reflète qu'une étape d'une mobilité beaucoup plus vaste, il n'est même pas certain que ces coordonnées géographiques correspondent à un nœud majeur du réseau de ces populations. Comment prendre en compte la mobilité collective de ces populations dans un SIG qui ne dispose que des coordonnées du lieu de recensement ?

Les mobilités intra-urbaines à Hyderabad en Inde

Nous avons rencontré des difficultés similaires dans l'approche de la mobilité intra-urbaine d'une grande métropole d'Inde du Sud (Bourguignon, 2002). L'objectif de l'étude était de mesurer l'impact de la création d'une technopole, Hitec-City (production de logiciel) sur le développement d'Hyderabad. L'observation des mobilités hu-

maines depuis cette technopole servait d'indicateur de l'intégration de cette nouvelle infrastructure dans la ville. Comme il n'existait aucune information disponible sur ce sujet, nous avons par enquête sur échantillon, essayé de reconstituer ces mobilités quotidiennes. La méthode s'inspire des enquêtes de géomarketing portant sur les déplacements urbains (Orhan, 1999). En questionnant les personnes sur l'ensemble des mouvements effectués la veille de l'enquête (le trajet, l'horaire, la raison du déplacement, le mode de transport ou encore le nombre de personnes impliquées...), nous avons pu reconstituer la mobilité des habitants d'un quartier. Nous avons construit un sondage aéré avec tirage systématique de façon à couvrir tout l'espace de ce quartier. Nous avons pu dresser à partir de ces informations sur les mobilités individuelles, des représentations des mobilités collectives selon des variables diverses comme le jour du déplacement et le sexe.

Deux informations sont privilégiées, l'importance de la fréquentation des quartiers de destination (point proportionnel) et surtout la fréquentation des tronçons des trajets (ligne proportionnelle). Une variation de valeur restitue l'éloignement depuis Madhapur, le quartier où a été implanté le technopole, pour faciliter la comparaison entre les axes parcourus. Sur cette carte, on peut observer une forte différenciation selon le sexe à la fois sur la quantité de mouvements effectués et sur l'ampleur des déplacements, avec une mobilité plus réduite pour les femmes. Malgré des difficultés de représentation liées au changement d'échelle entre la circulation dans le quartier et à l'extérieur de celui-ci, ces cartes permettent une vision inédite des mouvements à destination du reste de la ville. Mais nous ne disposons que des flux générés par les résidents du quartier vers le reste de la ville. Il manque les mouvements de ceux qui viennent y travailler ou rendre une visite depuis l'extérieur du quartier. Leur dénombrement devient beaucoup plus difficile car irrégulier dans le temps et l'espace, alors que nous avons pu interroger les habitants dans leur résidence.

Des comptages sur les voies d'accès restent possibles, mais ils seront difficiles à mettre en œuvre car il faut couvrir tous les accès possibles de Madhapur aux différentes heures de la journée et de la nuit. De plus, de simples comptages sont insuffisants car il faut obtenir des variables attributaires équivalentes au premier jeu d'enquêtes (âge, sexe, profession, raison du déplacement, etc.), sinon il sera impossible de faire correspondre deux bases d'informations aux modes de construction différents. Les contraintes augmentent considérablement lors de la collecte des informations pour les personnes en déplacement.

Lorsqu'une information de ce type est générée pour l'étude des mobilités intra-urbaines d'un quartier, il ne s'agit que d'un faible échantillon de la circulation de la ville d'Hyderabad. Les données recueillies, il reste à résoudre les problèmes de traitement et de représentation de cette information mais les outils font défaut. Pour traiter l'information collectée par enquête nous avons dû reconstituer tous les trajets à partir des déclarations des individus. Nous avons alors pu connaître le nombre total d'individus ayant emprunté un axe donné à un moment particulier. Compte tenu du système de collecte de l'information, c'est l'heure de déclenchement du mouvement qui est prise

Figure 2 - Déplacements le dimanche selon le sexe

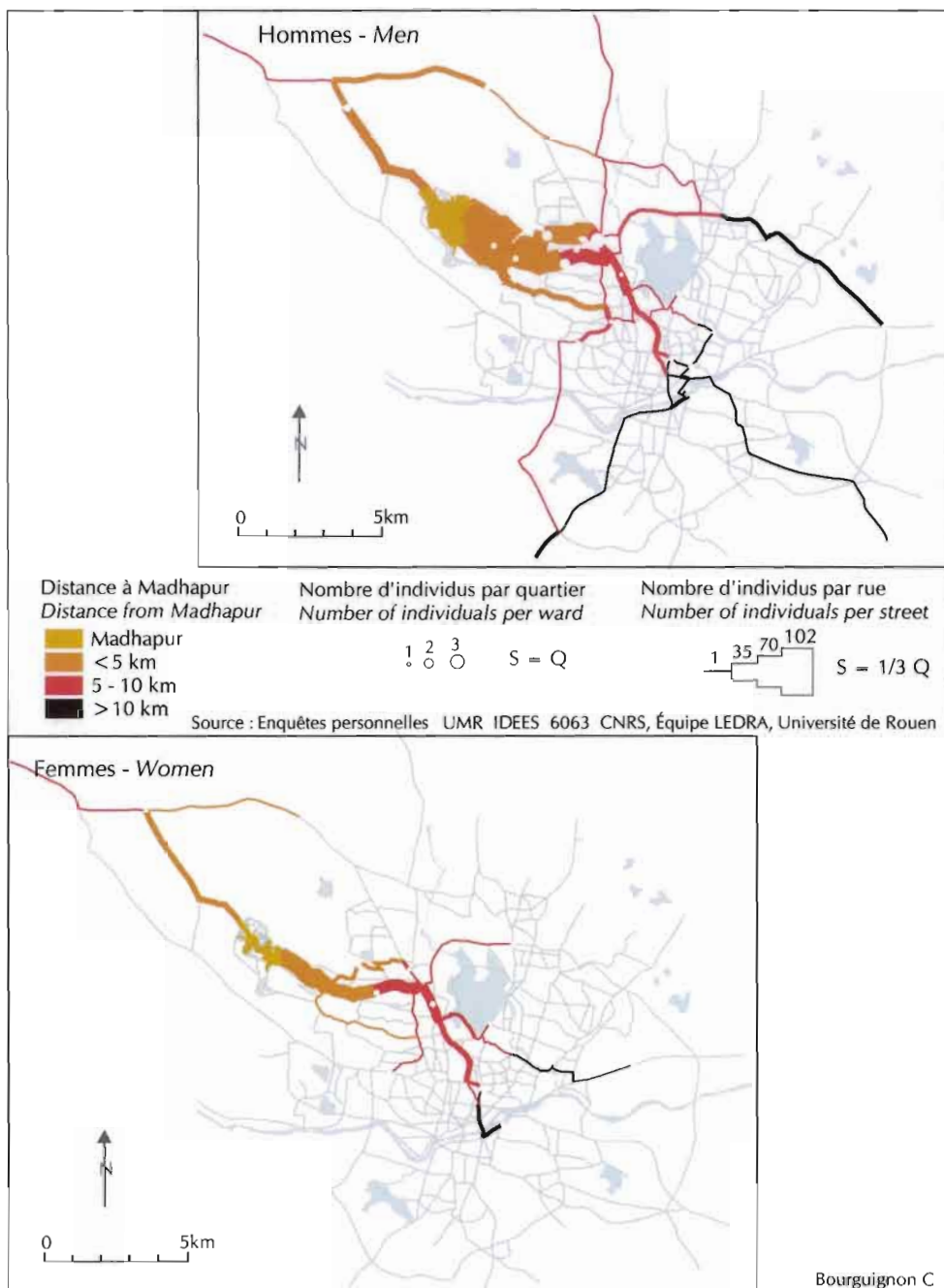
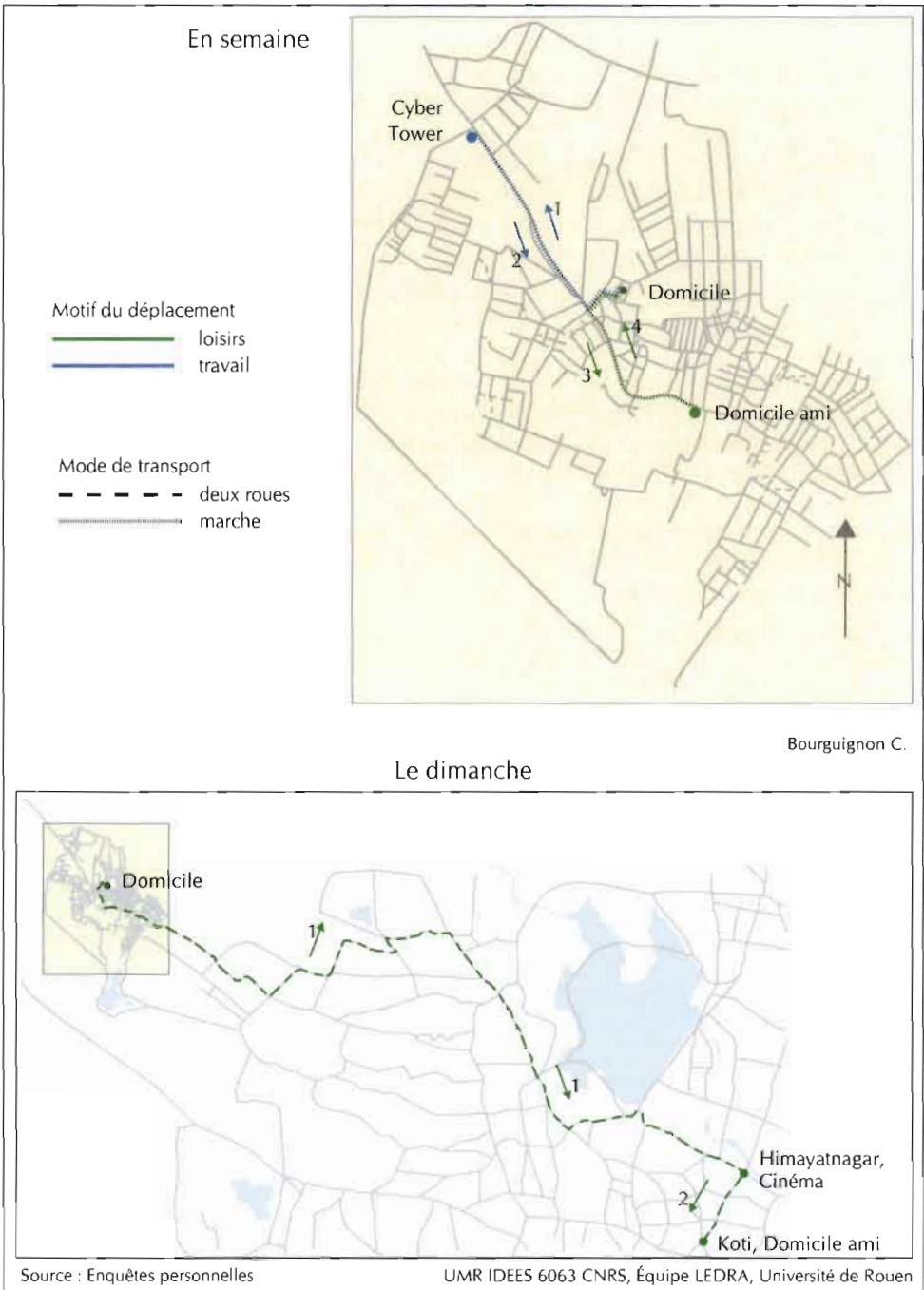


Figure 3 - Déplacements d'un employé de l'informatique



en compte car il était totalement impossible de savoir où se trouvait précisément l'individu sur le trajet compte tenu des aléas de la circulation et des différents modes de transports.

La mobilité a donc été transformée en stock d'individus parcourant un tronçon du réseau viaire de la ville. Ce n'est plus le mobile qui est géré comme dans un Système d'Information Géographique en temps réel, mais le résultat probable de son mouvement. Nous ne sommes plus dans le cas de parc naturel avec des métriques de déplacement uniformes (métrique pédestre). Dans une grande métropole indienne, les vitesses de déplacement sont très variables selon le mode de transport (piéton, vélo, moto, rickshaw, bus, voiture) et selon l'heure.

À défaut de connaître le positionnement des individus interrogés selon l'heure considérée, on peut croiser les attributs liés aux individus (âge, sexe, moyens de locomotion, etc.), mais à chaque fois par un jeu d'agrégation de l'information par axe qui interdit toute autre approche. En effet, chaque déplacement individuel a été converti en une suite de tronçons reliés aux variables attributaires de l'individu (sexe, âge, etc.). Lorsque l'on veut construire une représentation des déplacements, on réalise une agrégation du nombre d'individus empruntant un tronçon selon la ou les variables considérées. Le Système d'Information Géographique permet alors de représenter ces fréquentations. À titre d'exemple, quelques cartes ont été réalisées pour confronter quelques itinéraires individuels.

Tous les déplacements d'un employé de l'informatique ont été cartographiés. Chaque déplacement est distingué par une couleur et le moyen de transport utilisé est traduit par une variation de forme de la ligne. À cette échelle on a pu ajouter le sens du déplacement. On peut alors voir apparaître la logique individuelle du mouvement (l'aller et le retour ou encore la visite à un ami liée à un déplacement de loisir vers le cinéma) ou les problèmes d'échelle dans la cartographie des déplacements. Les mouvements de faible ampleur (à l'intérieur de Madhapur) peuvent difficilement apparaître sur une carte qui restitue l'ensemble de l'agglomération. Malheureusement, le système ne permet pas la construction à la volée de ces éléments puisque seules des sommes de déplacements par axe sont liées aux axes de transport. Sans possibilité de visualiser selon n'importe lequel des critères collectés, les mouvements de n'importe lequel des individus, il est difficile de comprendre les interdépendances entre les différentes mobilités de notre employé de l'informatique.

Discussion et conclusion

Discussion

Nous avons affronté des difficultés encore supérieures pour représenter les nomades de Mauritanie, car comme nous l'avions indiqué plus haut, ces mouvements ne sont pas renseignés, voir même plutôt minorés. Pour parvenir à représenter les

populations nomades, il faudrait connaître l'amplitude de leurs mouvements dans l'espace et dans le temps. À partir de ces informations, il serait tentant grâce à un Système d'information géographique de calculer la localisation potentielle d'un groupe à un moment donné. Une carte ainsi conçue se mettrait automatiquement à jour dans un Système d'Information Géographique en fonction de la date de consultation de l'information. Mais cette perspective est peu réalisable car contrairement à certains phénomènes physiques, ces mouvements sont difficilement modélisables. Si une inondation est un phénomène physique pris en compte de façon spatio-temporelle par un SIG, c'est que, toute proportion gardée, c'est un mouvement « simple » : mouvement de l'amont vers l'aval, remplissage des cuvettes en fonction de la topographie, rétention de l'eau en fonction de la capacité d'absorption des sols et du niveau de la nappe phréatique...

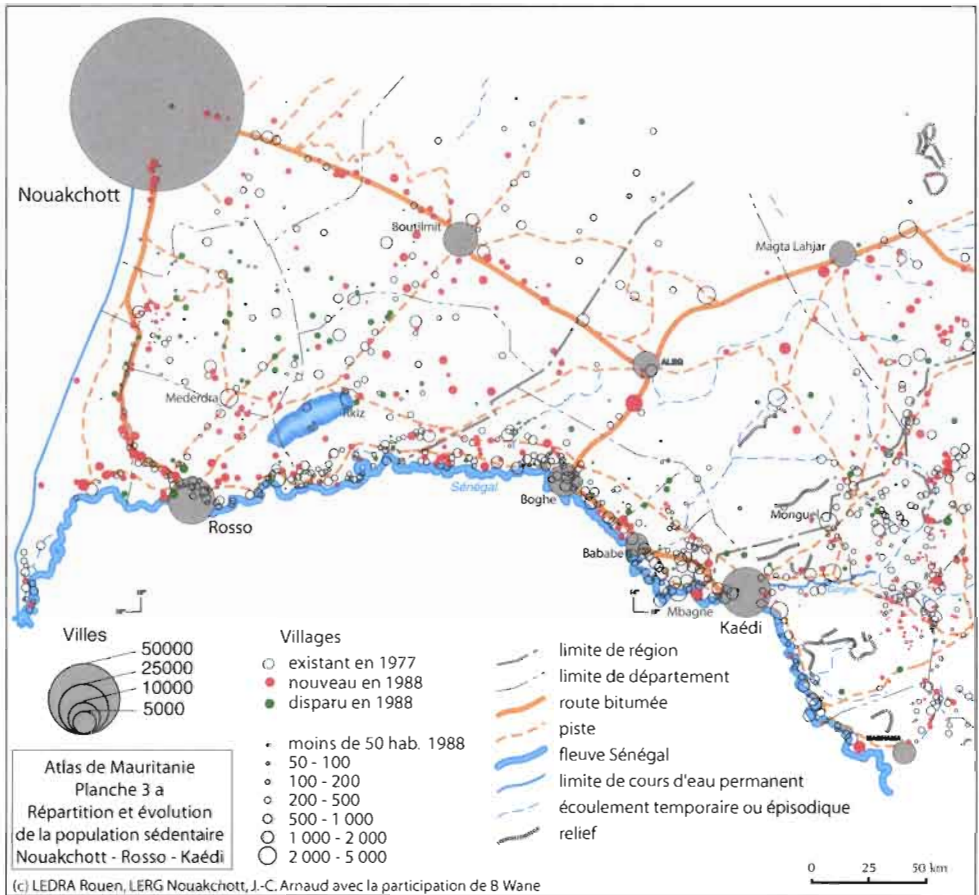
Nous appliquerons à cet exemple, les propos de C. Grataloup relatifs aux phénomènes de diffusion au sein des sociétés en pratiquant « l'enrichissement de l'analyse – en pistant les retro-diffusions, les mouvements de retours des influences qui font que les échanges entre sociétés ne ressemblent pas à des inondations ou à des incendies de forêts » (Grataloup, 2000). Les mouvements des nomades sont guidés par une multitude de facteurs dans lesquels l'appréciation humaine entre trop souvent en ligne de compte pour espérer produire une modélisation satisfaisante. Dans une étude sur les touaregs maliens, nous nous sommes rendus compte que pour chaque étape de nomadisation, le groupe éclate en différentes unités (bergers, hommes, femmes et enfants) qui se rassemblent dans des configurations extrêmes variables. Pour parvenir à intégrer ces populations nomades dans un Système d'Information Géographique, un suivi individuel des mouvements est nécessaire. L'obstacle n'est plus technique mais éthique alors que l'installation d'un réseau de points de mesure dans un bassin versant demeure envisageable. D'autre part, le mouvement est conditionné par des contraintes non spatiales comme les hiérarchies sociales qui existent entre les différents groupes mobiles et avec les populations sédentaires. Comment intégrer ces paramètres non spatiaux dans la prévision des mouvements ? L'idée même d'un comportement moyen calculable paraît discutable, ce qui caractérise ces mouvements c'est bien leur irrégularité.

En définitive, dans le travail sur la Mauritanie, si les mouvements des nomades n'ont pu être figurés et intégrés comme éléments visuels pour les décideurs devant utiliser cet outil, ils ne sont pas absents des documents produits (Leclerc, 2002). Même dans la représentation des populations sédentaires, il est possible d'introduire une part de mobilité en indiquant par exemple sur les planches de population totale par établissements humains, l'existence des différents lieux selon les recensements (en rouge les villages disparus et en vert les nouveaux villages).

Il ressort de cette comparaison diachronique un sentiment d'extrême variation des lieux d'implantations qui attestent de leur grande variabilité. Mais ce ne sont pas les mobilités qui apparaissent ici, car sauf par enquêtes complémentaires, nous ne connaissons pas les mouvements de population entre les lieux habités. Comme les mobili-

tés ne peuvent apparaître à travers les données du recensement, des études de terrain supplément au manque d'information⁴.

Figure 4 - Répartition de la population sédentaire.



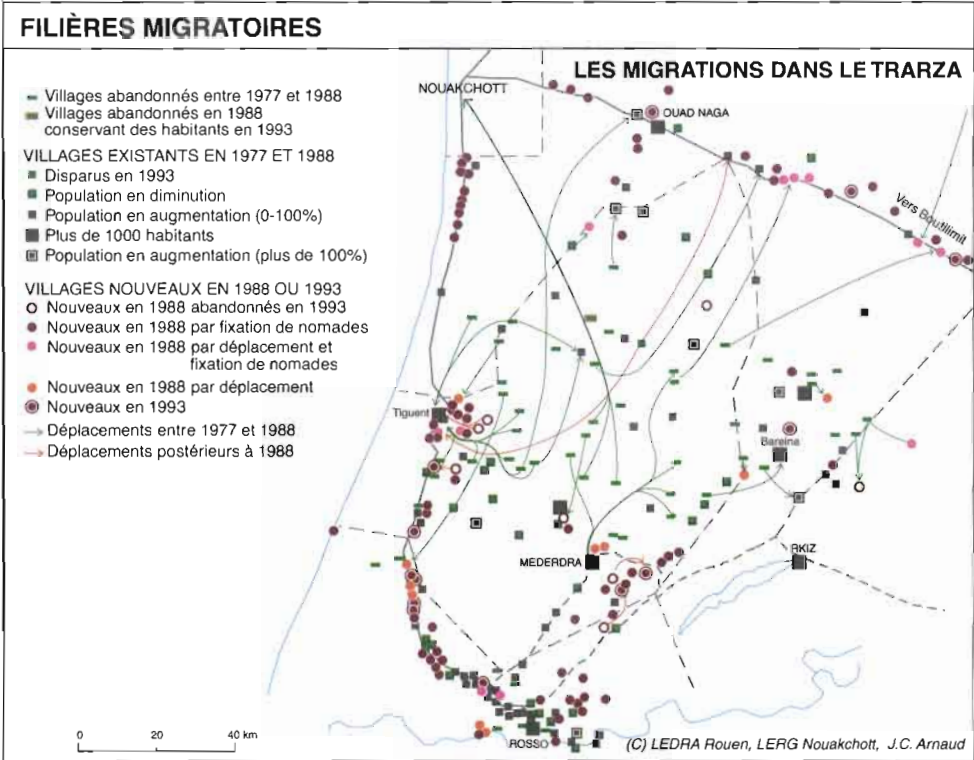
La première carte ajoute une dimension temporelle aux dynamiques déjà constatées puisqu'elle présente l'évolution entre le dernier recensement 1988 et 1993. Elle permet également de suivre les déplacements des villages constatés sur les cartes de répartition de la population sédentaire. On constate également que la dynamique se poursuit, certains villages nouveaux de 1988 ont déjà disparus et de nouvelles créations ont vu le jour en 1993, date du travail de terrain.

Sur la seconde carte, l'échelle d'analyse est encore plus grande, ce qui permet d'affiner encore l'approche et de faire entrer en jeu la société qui nous échappait jusqu'à présent. On superpose à la carte de répartition de la population de l'Assaba,

⁴ La planche 6^e montre de tels mouvements pour la région du Trarza.

Figure 5a - Filières migratoires

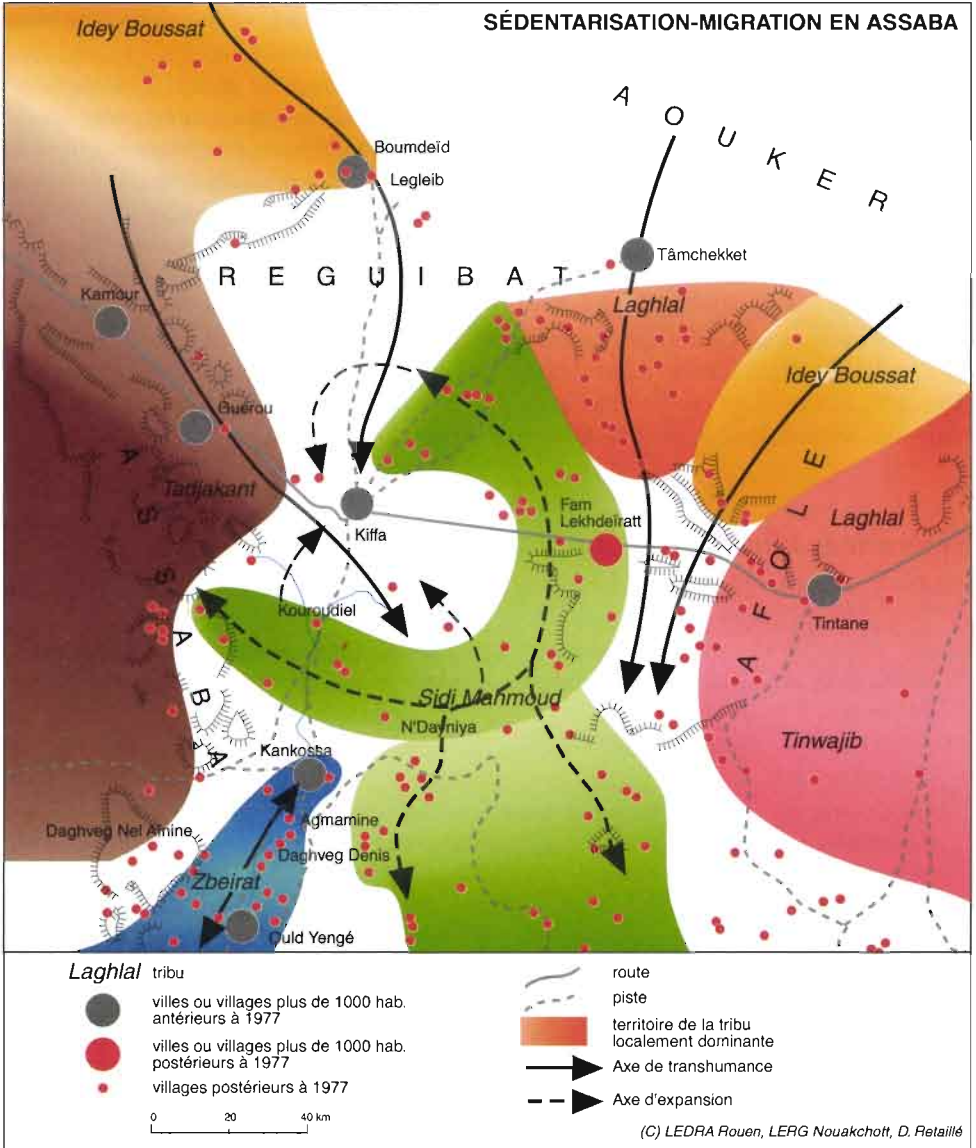
Atlas de Mauritanie - Planche 6 e



les territoires tribaux et leur dynamique. Les nombreuses implantations créées ne correspondent pas à la même réalité sociale et économique. Au Sud de l'Oued Karakoro, les Zbeïrat sont des éleveurs qui pratiquent le jardinage et qui s'installent en position médiane par rapport à leurs déplacements en saison des pluies et leurs pâturages de saison sèche sur l'oued. Au Nord et à l'Est, on trouve des villages fondés par d'anciens nomades qui possèdent encore des parcelles dans des oasis du Tagant. Ces installations correspondent à une extension de leur domaine vers le Sud. Ici, l'approche fine de la société permet d'interpréter différemment des points qui pourtant sur une carte de répartition se confondent. Ces cartes n'ont pas le caractère exhaustif du recensement, mais elles offrent un éclairage qui permet de relativiser les conclusions qu'un décideur peut tirer des cartes de répartition de la population.

La cartographie des populations proposée dans l'Atlas de Mauritanie, multiplie les points de vue pour rompre avec une statistique spatiale qui répond à la seule métrique topographique. Se pose en définitive la question de l'adaptation des SIG actuels au suivi des réalités réticulaires. Tant qu'il s'agit de réseaux physiques donc inscrits

Figure 5b - Filières migratoires



dans l'espace, les SIG prolongeant le paradigme de la carte (vision synoptique et statique), sont des outils bien adaptés à la gestion d'une topographie. Mais les topologies que l'on rencontre dans les réseaux non exclusivement spatiaux ne sont pas prises en compte. Or les mobilités humaines, comme les migrations, fonctionnent sur des topologies qui ne sont pas exclusivement spatiales. Les réseaux migratoires sont avant tout des réseaux sociaux, même s'ils doivent affronter la distance.

Conclusion

Les Systèmes d'information géographiques ont peu abordé la dynamique spatiale des populations en dehors de leurs traces matérielles, ce qui les cantonne au paradigme de la carte et de l'espace euclidien. Des tentatives ont bien sûr abouti à l'intégration du temps dans une réflexion spatiale avec les anamorphoses qui représentent un espace fonctionnel et déforment l'espace euclidien en fonction d'une distance-temps ou distance-coûts (Pumain et Saint-Julien, 1997). Mais l'intégration de l'espace nomade, un espace lacunaire, fait de lieux surgis des circonstances, reliés par le temps plus que par un quelconque support matériel reste à réaliser. Or cet espace nomade (Retaillé, 2001) n'est pas seulement l'apanage de quelques groupes résiduels. Dans un monde de plus en plus réticulaire, l'espace des diasporas ou des employés expatriés offre des ressemblances avec ce dernier. La prise en compte du temps ou plutôt des temporalités spatiales est un champ de recherche théorique en pleine évolution actuellement (Elissalde, 2000). Il ne faudrait pas que l'absence de données et d'outils adaptés à ces nouvelles réalités les excluent de facto des recherches utilisant les SIG.

Références bibliographiques

- ATLAS DE MAURITANIE, *Migrations et gestion du territoire*, 1999, Rouen, Lecerf, planches 38, 32 p. 2-95137-45-0-x
- BOURGUIGNON C., 2002. Cartographie des mobilités urbaines : pratiques spatiales des habitants de Madhapur (Hyderabad, Andhra Pradesh, Inde). Mémoire de maîtrise, Université de Rouen.
- CASSINI (1999). Représentation de l'espace et du temps dans les SIG. *Revue internationale de géomatique* 9(1).
- CHARDONNEL S., and W. G. M. KNAAP van der, 2002, Managing tourist time-space movements in recreational areas : a comparative study of a protected natural park in the French Alps and the "De Hoge Veluwe" Dutch National Park using the same methodology, *Revue de Géographie Alpine* (2), pp. 37-48
- DAUPHINÉ A., 2001, *Risques et catastrophes : Observer-Spatialiser-Comprendre-Gérer*, Paris, Armand Colin, 288 p. 2-200-25042-8
- DELAUNAY D., (2001). *L'inscription dans l'espace des biographies individuelles*. XXIV^e Conférence Générale de l'IUSSP, 18-24 août 2001, Salvador (Brésil).
- DYKES J., 1995, Exploring spatial data representation with dynamics graphics cartographic, <http://www.mimas.ac.uk/argus/ICA/Dykes/0~index.html>; 1999
- ELISSALDE B., 2000, Géographie, temps et changement spatial, *L'Espace géographique* (3), p. 224-236
- FOUCAULT M., 1975, *Surveiller et punir*, Paris, Gallimard.
- GRATALOU, C., 2000, «L'individu géographique», in *Logiques de l'espace, esprit des lieux. Géographies à Cerisy*, Edited by J. Lévy and M. Lussault, p 57-68, Paris, Belin.
- LECLERC E., 2002, Cartographier les populations ou les sociétés ? : problèmes de représentations dans deux atlas en Afrique de l'Ouest, *Espace, Populations, Sociétés* (1-2), p. 133-139
- ORHAN J.-M., 1999, Cartographie dynamique des déplacements urbains, *Bulletin du Comité*

Français de Cartographie (162), pp. 41-46

PUMAIN, D., SAINT-JULIEN T., 1997, *L'analyse spatiale : 1. Localisations dans l'espace, Géographie*, paris, Armand Colin, 167 p. 2-200-01897-5

RETAILLÉ D., 2001, *Cartographier l'espace nomade*, Colloque de l'AFEMAM, Tours, 1999, *Astrolabe* (3),

La voie de l'étonnement : favoriser l'abduction dans les Systèmes d'information géographique

Arnaud BANOS, Université de Pau, France
E-mail : arnaud.banos@univ-pau.fr

Résumé : Cet article aborde la question de la nécessaire évolution des systèmes d'information géographique, aujourd'hui encore davantage dédiés à la gestion de l'information spatiale qu'à son analyse. Nous proposons d'accroître la capacité exploratoire de ces environnements en y favorisant le principe logique d'abduction, que l'on peut voir comme une incitation à se laisser guider par la découverte de l'inattendu. Notre argumentation s'appuie sur un exemple d'exploration spatio-temporelle de la mobilité quotidienne.

Mots clé : abduction, analyse spatiale, systèmes d'information géographique, mobilité quotidienne, spatio-temporel.

The way of the astonishment: to support abduction in the Geographic Information Systems

Abstract: *Primarily dedicated to data management, GIS must evolve towards data analysis environments. As Stan Openshaw recalled, "analysis is no longer an option". Enhancing their exploratory capacities therefore involves replacing the logical process, abduction, at the heart of these systems. An exploration of urban surveys on daily mobility will be used to illustrate this point of view. Map animation, interactive space-time exploration and automated search for patterns will be combined, within an interactive spatial data-mining strategy.*

Key words : *abduction, Exploratory spatial data analysis, Geographic Information Systems, Urban mobility.*

Introduction

L'avènement et la diffusion des systèmes d'information géographique depuis les années quatre-vingts ont considérablement modifié les conditions de travail des spécialistes de l'information géographique, ne serait ce que par la diversité et la richesse des bases de données spatiales aujourd'hui disponibles et exploitables. Si les systèmes d'information géographique ont été positionnés dès l'origine, et ce à juste titre, sur le créneau de la gestion de cette masse d'information, force est d'admettre qu'aujourd'hui encore un manque crucial de méthodes et outils d'analyse s'y fait sentir. La faible implication de la communauté des chercheurs dans le processus même de production de ces systèmes, processus guidé par des motivations d'ordre davantage commercial que

scientifique, explique sans doute en partie cette lacune persistante. Pourtant, comme le souligne Stan Openshaw : « *analysis is no longer an optional activity* » (Openshaw, 1995). Dans le même esprit, si l'on accepte l'idée que « *spatial is special* » (Fotheringham et al., 2000), alors on doit admettre que les spécificités de l'information spatiale impliquent de recourir à des méthodes d'analyse et de modélisation spécifiquement spatiales. La nécessaire évolution des systèmes d'information géographique, d'outils de gestion de l'information spatialisée vers de véritables environnements d'analyse spatiale intégrant les principales avancées dans le domaine, implique toutefois la mise en place d'une réflexion collective préalable sur la logique de l'investigation scientifique et les éventuelles spécificités propres au raisonnement géographique. L'objectif de cet article est de montrer, exemples à l'appui, que les capacités toujours croissantes de l'ordinateur, en termes de puissance de calcul mais également d'affichage graphique, peuvent être avantageusement mises au service des capacités « naturelles » de l'utilisateur, en termes de visualisation, d'interprétation, de déduction et de raisonnement par analogie. En ce sens, l'exploration est une composante à part entière de l'activité scientifique, que l'on peut rattacher à la logique abductive proposée par le philosophe Charles Sanders Peirce.

La voie de l'étonnement

L'affirmation de Stan Openshaw, selon laquelle « *the overriding end-user's need in a GIS context is for exploratory spatial analysis tools* » (Openshaw, 1995) est sans doute excessive. Réduire les systèmes d'information géographique à une seule et unique logique d'investigation est en effet dommageable, d'une part en raison de l'exclusion de méthodes spatiales d'ordre plus confirmatoire (par exemple les modèles d'interaction spatiale ou les modèles de localisation-affectation) ou d'avantage orientées vers la simulation, mais également par la réduction inhérente du potentiel d'application des SIG qui en découlerait : peut-on en effet retenir les mêmes principes d'exploration quelle que soit la taille (individus*variables) des jeux de données analysés ? Les travaux menés dans le domaine du *data-mining spatial* (Zeitouni et Yeh, 1999) suggèrent au contraire que des stratégies spécifiques doivent être imaginées. Pourtant, cette mise en exergue de la démarche exploratoire offre l'avantage de souligner l'une des potentialités majeures des SIG de demain : impliquer réellement l'utilisateur au sein des univers virtuels qu'il manipule, en lui fournissant à cette fin des bouquets de méthodes alternatives et complémentaires, spécifiquement adaptées à la nature géographique de l'information. Une telle évolution, dont on pressent les germes dans nombre de prototypes développés depuis la fin des années quatre-vingt-dix¹ gagnerait toutefois à s'appuyer sur une réflexion épistémologique plus large. Ainsi, il est possible de montrer que la démarche exploratoire, dans son acception la plus large, peut être rattachée à

¹ On citera à titre d'exemple « CDV » développé par Jason Dykes (<http://www.geog.le.ac.uk/jad7/>), « Visual Studio » développé par Mark Cahegan (<http://www.geovista.psu.edu/>), « CommonGIS » développé par Hans Voss (<http://commongis.jrc.it/>), « MANET » développé par Anthony Unwin, Martin Theus et Heike Hofmann (<http://www.1.math.uni-augsbourg.de/Manet/>), « ARPEGE » développé par Didier Josselin et « GéoGrapheur » développé par Arnaud Banos (ARPEGE et GéoGrapheur : <http://www.mgm.fr/libergeo/index2.html>).

une logique d'investigation scientifique particulière, l'abduction (Banos, 2001 ; Besse, 2002 ; Chong Ho, 1994).

L'abduction comme logique d'investigation

Logicien, mathématicien, astronome, chimiste, météorologue, Charles Sanders Peirce fut également, aux dires de Karl Popper, « l'un des plus grands philosophes de tous les temps » (1991). Anti-cartésien et anti-hégélien, Peirce pensait que le doute complet ne pouvait fournir qu'un très mauvais point de départ. Pure invocation, le doute cartésien était selon lui une condition préliminaire, et il exhortait ses lecteurs à ne pas faire « semblant de douter en philosophie de ce dont nous ne doutons pas dans nos cœurs » (Peirce, 1993). De même, il était persuadé qu'il n'est nul besoin d'être certain de tout pour commencer à se forger une connaissance. Selon Peirce, plus à l'aise avec des croyances même passagères qu'avec un doute permanent, l'esprit scientifique progresse par paliers de connaissances, certes imparfaites et incomplètes, mais qui lui permettent de progresser toujours plus. Cette progression de la connaissance par un va-et-vient permanent (dialectique, bien que Peirce n'utilisa pas le terme) entre croyance et doute, jette les bases d'une philosophie pragmatique essentielle. Faillible, la connaissance l'est par nature. Toutefois, un processus d'investigation permanent est à même de permettre à la connaissance de s'auto-corriger, par essai-erreur. Nos conclusions seront toujours des tentatives temporaires, appelées à être remises en cause. Cette évolution progressive ne peut cependant se concevoir, selon Peirce, que si l'on accepte l'idée d'un système logique complexe, combinant abduction, déduction et induction. Première composante du triptyque, l'abduction désigne cette capacité de l'être humain à générer des hypothèses temporaires à partir de l'information qu'il reçoit (Chong Ho, 1994). Cette logique de génération d'hypothèses se double d'une logique de « parcimonie » :

- un phénomène surprenant X est observé ;
- parmi diverses hypothèses (A, B, C), A semble être capable d'expliquer en partie au moins X ;
- il y a alors une raison valide d'explorer A plus en détail.

Domaine de la créativité, l'abduction renvoie à la capacité du scientifique à se mettre en position d'étonnement, à se laisser guider par la recherche de l'inattendu. Pour Claude Bernard, une découverte est justement « un rapport imprévu qui ne se trouve pas compris dans la théorie, car sans cela il serait prévu » (Schlanger, 1991). Dans ce contexte, le scientifique ne doit pas chercher à explorer systématiquement toutes les pistes possibles. Il doit s'en remettre à son intuition et à son expérience pour retenir quelques pistes privilégiées qu'il continuera d'explorer (principe de « parcimonie »). Il progressera ainsi de choix en choix, toujours prêt à saisir l'inattendu. Cette posture intellectuelle pose néanmoins un sérieux problème de méthode, déjà soulevé par Francis Bacon (Bacon, 1597). Comment en effet produire ces idées investigatrices nouvelles par règle et par méthode ? Pour Claude Bernard, les idées fécondes engendrées au cours du processus abductif constituent le facteur le plus important du travail expérimental et il n'existe pas de méthode capable de les faire naître. « On peut juste favoriser la disposition inventive de l'esprit en l'encourageant

à la liberté. La liberté dont il s'agit ici est une faculté d'initiative, d'intégration et de décrochement. C'est la liberté d'accepter une donnée qui disconvient au système, et qui va transformer toute l'interprétation » (Schlanger, 1991). La déduction permet ensuite d'évaluer les hypothèses générées au cours de cette phase, tandis que l'induction permet de les tester empiriquement. Le processus de compréhension, qui mène à la connaissance, suppose que ces trois composantes soient associées étroitement. Abduction et déduction relèvent de la compréhension à un niveau conceptuel d'un phénomène, tandis que l'induction concerne la vérification empirique systématique. Au stade de l'abduction, il s'agit d'explorer ses données, de manière à faire germer des hypothèses, que l'on évaluera et testera ensuite au sein d'un système logique plus formel et précis. L'analyse exploratoire des données, telle qu'elle fut initiée par John Wilder Tukey (Tukey, 1977), s'inscrit à merveille dans ce processus abductif. Elle semble s'ajuster parfaitement à cet écrin philosophique façonné bien des années plus tôt par Charles Sanders Peirce, et dont la portée dépasse largement le cadre restreint de l'analyse de données.

Les fondements abductifs de l'analyse exploratoire des données

Courant de la statistique moderne, l'analyse exploratoire des données est irrémédiablement attachée aux travaux de John Wilder Tukey (1915-2000), l'une des figures emblématiques de la recherche scientifique américaine du xx^e siècle. Plus de trente ans après les premières joutes, ce courant marque toujours une rupture profonde avec la pratique statistique dominante, et se caractérise à la fois par une attitude, des méthodes et des outils tout à fait spécifiques. Titulaire d'un *master degree* en chimie et d'un doctorat en mathématiques de l'université de Princeton, John Wilder Tukey n'est tombé dans le « chaudron statistique » que tardivement, de manière tout à fait fortuite. Impliqué dans l'effort de guerre américain, il rejoint le *Fire Control Research Office* en 1941, où il occupe le même bureau que le statisticien Charlie Winsor. Pendant trois années, il partage selon ses propres termes « une moyenne de 1.9 repas par jour avec Charlie Winsor » (Tukey, 1997), se forgeant à cette occasion une culture statistique aussi vaste que libérale, en rupture avec le point de vue dominant de l'époque. De 1945 à 1985, il consacre son temps entre l'enseignement de la statistique à Princeton, ses activités de recherche et de direction au sein des laboratoires AT&T Bell Company à Murray Hill, véritable pépinière de talents en tous genres, et de multiples activités de conseil et d'expertise auprès de compagnies privées et de services gouvernementaux. Auteur ou co-auteur de plus de cinq cents articles, directeur de thèse de plus d'une cinquantaine de doctorants, John Tukey a laissé un héritage considérable, aux ramifications multiples, dépassant le seul cadre de la statistique (Leguen, 1990). C'est toutefois au sein de sa discipline d'adoption qu'il a le plus oeuvré, renouvelant considérablement la manière dont les statisticiens appréhendent l'analyse des données.

« *Once upon a time, statisticians only explored* » (Tukey, 1977). Pour compenser l'absence de moyens de calcul et dans une moindre mesure de théories, les statisticiens ont cherché très tôt à développer des outils simples et pertinents, souvent graphiques, aptes à résoudre les problèmes auxquels ils étaient confrontés. Puis, au cours du xix^e siècle, la théorie statistique a connu une véritable révolution : au prix d'hypothèses

souvent contraignantes sur la nature et la collecte des données, des procédures d'inférence rigoureuses, puissantes et optimales ont pu être élaborées (Ladiray, 1999). En quête d'optimalité, les méthodes et techniques perdirent en flexibilité. Le savoir faire des statisticiens précédents fut oublié, rejeté. Toute méthode ne s'inscrivant pas explicitement dans le credo confirmatoire fut décriée avec mépris comme relevant de la « statistique descriptive », quelque soient les services qu'elle ait pu rendre auparavant (Tukey, 1977). Se repliant sur ces nouveaux fondements théoriques, la statistique confirmatoire – aujourd'hui dominante – s'est rapidement éloignée de son objet même, les données, lui substituant un culte de la distribution « normale », idéale, parfaite... introuvable. Conséquence de ce recentrage théorique : « malgré des progrès considérables, il faut bien reconnaître que les données prennent toujours un malin plaisir à malmener, parfois même ridiculiser, les méthodes statistiques usuelles les plus sophistiquées » (Ladiray, 1999).

Comparée dès le début à un travail de détective (Tukey, 1969), accumulant des indices matériels au moyen de techniques éprouvées, l'analyse exploratoire des données s'inscrit délibérément dans une logique d'observation et de découverte, par opposition à la logique d'expérimentation et « d'administration de la preuve » typique de la statistique confirmatoire. Il s'agit d'une activité d'investigation, profondément incisive, dédiée à la découverte de l'inattendu, « ...if necessary by figuratively knocking the analyst's head against the wall until he notices it » (Tukey 1986). Guidé par les données, l'explorateur doit faire preuve d'une grande ouverture d'esprit et d'un scepticisme à toute épreuve, qui le conduisent à tester une panoplie conséquente de méthodes et d'outils au comportement varié mais toujours connu, dans un souci de connaissance et de compréhension. En regardant ses données sous toutes les facettes, l'explorateur se met en position d'étonnement, attentif aux tendances comme aux détails, progressant pas à pas ou par sauts de puce, par formulations successives d'hypothèses qu'il teste rapidement au moyen d'outils adéquats, dont l'optimalité n'est pas le critère essentiel : « l'explorateur n'accorde pas une grande importance à l'optimalité de son outil : il lui suffit de savoir qu'il se comporte bien dans la plupart des situations » (Ladiray, 1999). Cette attention portée à la tendance mais aussi aux détails, dans une perspective itérative, est une caractéristique fondamentale de la logique exploratoire. Comme le dit John Tukey, « bien sûr, le plus souvent les détails n'apportent rien de plus, mais il est important de se préparer pour ces quelques occasions où ils apportent énormément » (1977).

La traduction opérationnelle de ces principes généraux, que l'on retrouve de manière plus ou moins explicite dans les travaux les plus récents consacrés à l'analyse spatiale exploratoire des données (Banos, 1999, 2001a,b,c, 2002 ; Brunson, 1998, 2001 ; Brunson et al., 1996 ; Fotheringham, 1997 ; Fotheringham et al., 2000 ; Haslett et al., 1991 ; Josselin, 1999, 2003 ; Kraak, 1998 ; Kwan, 2000 ; Unwin, 2000 ; Monmonier, 1989 ; Unwin et al., 1998), implique de choisir un environnement de programmation adéquat, les logiciels SIG actuels étant encore trop peu ouverts pour permettre des implémentations de grande envergure à des coûts raisonnables. Environnement de programmation statistique gratuit, bénéficiant d'un langage de programmation (LISP), d'une architecture orientée-objet, d'une riche bibliothèque de fonctions statistiques et de capacités graphiques dynamiques tout à fait exceptionnelles, Xlisp-Stat (Tierney,

1990) possède en revanche les qualités requises pour assurer cette fonction de prototype. C'est donc au sein de cet environnement ouvert que nous avons choisi de développer GéoGraveur (<http://www.univ-pau.fr/~banos/banos.html>).

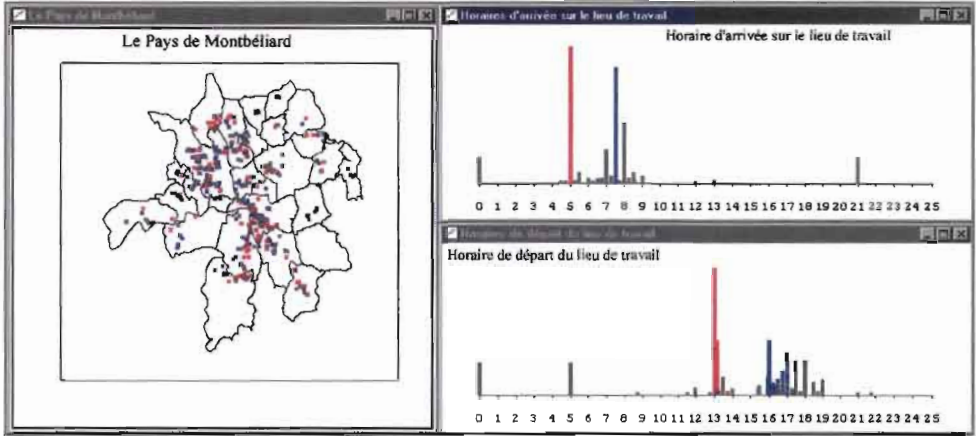
L'interactivité graphique au service de l'exploration spatio-temporelle de la mobilité quotidienne

Un paradoxe intéressant : individuelles par nature et par construction, les données d'enquête sont très rarement exploitées dans cette perspective. La richesse et la diversité de l'information dont elles sont le support sont très souvent réduites par de simples opérations de comptage. La sacro-sainte « synthèse » n'est évidemment pas étrangère à l'affaire. Pourtant, ce raccourci synthèse = réduction est pour le moins discutable, surtout si l'opération est effectuée de manière routinière. D'un point de vue exploratoire, une telle pratique est peu optimale, et ceci d'autant plus si l'objectif avoué est d'aboutir à une connaissance fine des caractéristiques et comportements des individus. L'exploration graphique interactive de données d'enquête est pourtant particulièrement parlante, surtout si ces données ont été géoréférencées au préalable. Sur la carte de la figure 1, chaque point correspond ainsi à un salarié de Technoland, la principale zone industrielle du Pays de Montbéliard (après Peugeot), enquêté par nos soins (Banos, 2001b ; 2002). Les graphiques de droite, dénommés « *stacked-plot* », consistent en un empilement vertical d'individus commençant (en haut) ou finissant (en bas) de travailler à la même heure. Ils montrent la répartition horaire des départs vers et des retours en provenance de Technoland, un jour de semaine. On remarquera les pics de 5h, 7h30, 8h et 21h, qui regroupent 80 % des départs. Les couleurs affectées à ces différents pics illustrent sur le papier l'idée de « sélection graphique interactive », permettant à l'utilisateur de visualiser très rapidement, au moyen de sa souris, la localisation d'individus pour un ou plusieurs horaires donnés.

L'utilisation croisée de ces trois paramètres (le lieu de domicile, l'heure d'entrée et l'heure de sortie) permet d'identifier des configurations spatio-temporelles plus ou moins favorables à la mise en place de services de transport en commun classiques. On remarquera ainsi, à titre d'exemple, que les individus commençant à travailler à 5h sortent entre 13h et 13h15, tandis que plusieurs horaires de sortie correspondent à l'heure d'embauche 7h30.

Cette entrée temporelle, conduisant à la hiérarchisation d'une information spatiale associée, n'est cependant pas exempte de critiques. Que peut-on dire par exemple des configurations spatiales isolées dans cette première figure ? Sommes-nous réellement capables de qualifier visuellement les semis de points mis en valeur ? Une première solution consiste alors à enrichir ces outils graphiques de base au moyen de guides de lecture numériques, utiles pour distinguer des situations visuellement peu contrastées. On illustrera ci-après ce principe en ajoutant un guide de lecture spatial et temporel.

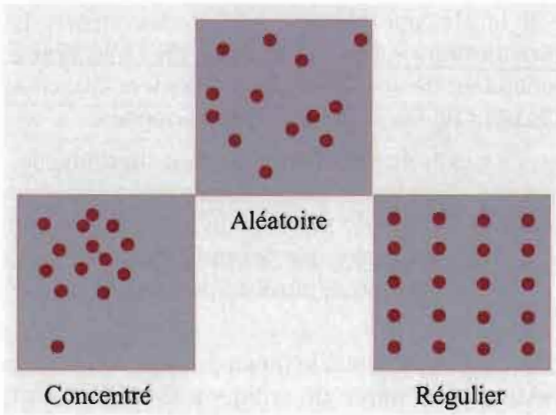
Figure 1 - L'interactivité graphique au service d'une exploration spatio-temporelle
 (l'existence d'un lien informatique dynamique entre ces trois fenêtres permet leur exploration manuelle combinée à l'aide de la souris)



S'adjoindre un guide de lecture spatial...

Soient les trois semis de points de la figure 2 : comment distinguer ces trois configurations par un indicateur numérique et qualifier le plus grand nombre possible de situations intermédiaires ?

Figure 2 - Trois semis de points de référence



Les travaux précoces de Clark et Evans (1954) présentent l'intérêt d'aborder ce problème de manière simple et efficace. La méthode proposée, fondée sur une analyse du type « plus proche voisin », consiste à comparer un semis de points observé avec son semis théorique associé, généré sous l'hypothèse d'une distribution spatiale aléatoire des événements. En pratique, la distance euclidienne d_i de chaque point à son voisin le plus proche est calculée, et la distance moyenne est estimée :

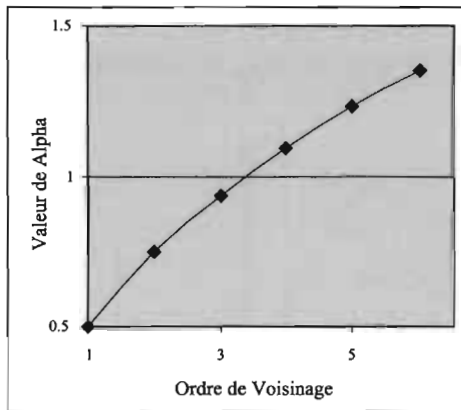
$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n}$$

avec n le nombre de points. Clark et Evans montrent alors que la valeur théorique $E(d)$ de \bar{d} , sous l'hypothèse d'un « processus ponctuel homogène de Poisson », peut être estimée correctement par l'équation :

$$E(d_i) = \alpha \sqrt{S/N}$$

avec S la surface de la zone étudiée et N le nombre de points. α est une constante dont la valeur dépend de l'ordre de voisinage retenu. À l'ordre 1, elle est fixée à 0.5 et croît de manière quasi linéaire avec l'ordre de voisinage retenu (fig. 3).

Figure 3 - Valeur du paramètre α en fonction de l'ordre de voisinage (d'après Boots et Getis, 1988)



Une fois ces deux indicateurs \bar{d} et $E(d)$ estimés, un indice synthétique I peut être construit :

$$I = \frac{\bar{d}}{E(d_i)}$$

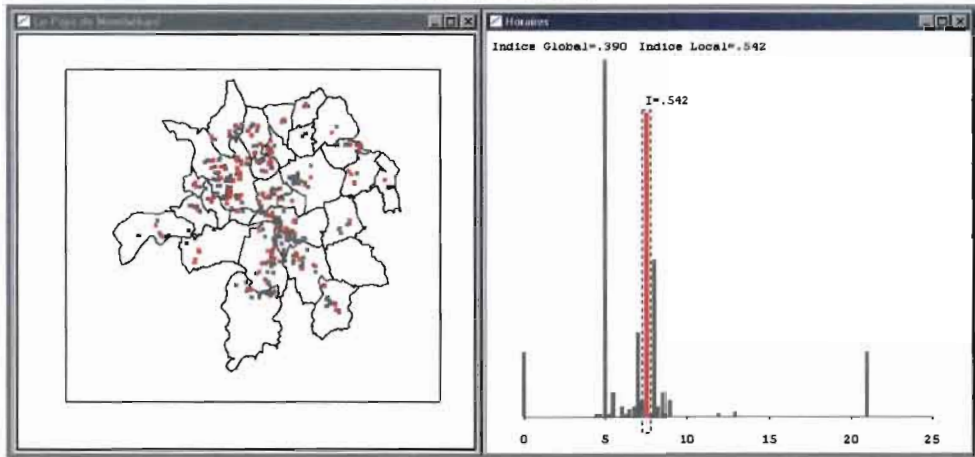
« Cet indice présente le grand avantage de pouvoir être apprécié sur une échelle qui va du modèle de la distribution totalement concentrée ($I=0$) à celui de la distribution régulière ($I \approx 2$) en passant par celui de la distribution aléatoire quand $I=1$ » (Pumain et Saint-Julien, 1997). Sur ces bases, il est possible de fournir en permanence un indicateur pratique à l'explorateur, apte à guider ses interprétations. La figure 4 illustre cette idée en se focalisant sur les individus commençant à travailler à 7h30 dans la zone industrielle « Technoland ».

Lorsque l'utilisateur sélectionne un groupe d'individus au moyen de sa souris (ici l'horaire 7h30), l'indice de concentration de Clark et Evans est immédiatement calculé, s'affichant automatiquement à la fois sur la partie supérieure du graphique temporel et

au sommet de la sélection. Par ailleurs, l'indice global est également donné. À l'échelle de la Communauté d'Agglomération, l'indice I décrit une certaine tendance à la concentration spatiale des individus ayant répondu à l'enquête ($I=0.39$). Une structure spatiale bi-polaire est effectivement décelable, regroupant à l'ouest quelques communes autour de Montbéliard, et au sud autour d'Audincourt. Considérés isolément, les individus sélectionnés en rouge exhibent en revanche une distribution spatiale plus diluée ($I=0.54$). Cette première approche pourrait être enrichie de différentes manières, tant au niveau numérique que graphique. Toutefois, une procédure complémentaire nous semble devoir être abordée en priorité : la dimension spatiale est décrite ici conditionnellement à la dimension temporelle, de manière non symétrique. Peut-on par conséquent inverser la logique d'investigation elle-même, de manière à disposer également de guides de lecture temporels ?

Figure 4 - Un guide de lecture spatial interactif, mis à jour en temps réel

(l'existence d'un lien informatique dynamique entre ces deux fenêtres permet leur exploration manuelle combinée à l'aide de la souris)



...doublé d'un guide de lecture temporel

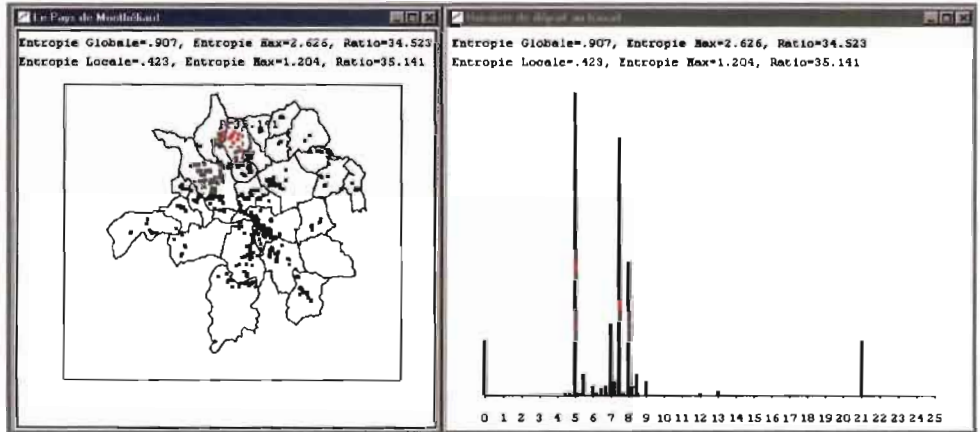
Nous ne cherchons plus ici à décrire une configuration spatiale associée à une configuration temporelle fixée, mais à effectuer l'opération inverse : connaissant la manière dont un groupe d'individus se distribuent dans l'espace, peut-on qualifier simplement la manière dont ils se distribuent également dans le temps ? Autrement dit, si l'on se ramène à l'exemple de Montbéliard, comment décrire de manière numérique la répartition horaire de groupes d'individus sélectionnés à partir de la carte de leur semis de points ? Il fait sens, au moins dans un premier temps, de recourir à l'entropie (Phipps, 1981 ; Yaglom et Yaglom, 1969), mesure initialement introduite pour la résolution de certaines questions de la théorie de la transmission des communications, et qui affecte à chaque issue i d'un événement une incertitude égale à $\log(P_i)$:

$$H = -\sum_{i=1}^k \frac{1}{k} \log(P_i) = -\sum_{i=1}^k P_i \log(P_i)$$

La valeur de l'entropie évolue entre $H=0$ (entropie nulle, incertitude minimum, une seule issue réalisée) et $H=\log(k)$ (entropie maximum, incertitude complète, toutes les issues sont réalisées de manière équiprobable). Cette mesure classique souffre toutefois d'un « défaut de fabrication ». En effet, la valeur de H ne dépend que des probabilités des différentes issues de l'expérience et nullement de la nature de ces issues, ni du fait qu'elles soient, par exemple ici, proches ou éloignées. Cette indépendance de l'entropie vis-à-vis des valeurs des issues mêmes de l'expérience s'explique par le fait que, «...dans la détermination du temps nécessaire à la transmission d'une communication ou dans celle du coût de cette transmission, le contenu du message lui-même est absolument sans importance...» (Yaglom et Yaglom, 1969). Il est cependant possible de minimiser ce défaut par la visualisation conjointe de la distribution horaire des individus sélectionnés, comme l'illustre la figure 5. Au moyen de sa souris, l'explorateur balaye sa zone d'étude, au gré de ses intuitions. Les individus tombant à l'intérieur de la zone de sélection graphique sont alors différenciés (couleur rouge), et leur répartition horaire décrite par trois indicateurs : l'entropie H , l'entropie maximum $\log(k)$ et le ratio $\left(\frac{H}{\log(k)}\right) * 100$

Figure 5 - S'adjointre un guide de lecture temporel pour explorer l'espace

(l'existence d'un lien informatique dynamique entre ces deux fenêtres permet leur exploration manuelle combinée à l'aide de la souris)



On remarquera que l'entropie globale caractérise bien la répartition horaire générale, dominée par quelques horaires clés. L'indicateur local permet de préciser cette silhouette d'ensemble, en mettant en évidence des variations locales parfois considérables. La sélection retenue à titre d'exemple est à cheval sur les communes de Grand-Charmont et de Béthoncourt, et identifie un regroupement intéressant de clients potentiels. Le ratio, de l'ordre de 35 %, décrit en effet une répartition horaire bi-modale favorable à plusieurs regroupements (huit individus commencent à 5h00, quatre à 7h30 et deux à 8h00). L'affichage immédiat des horaires correspondants permet de vérifier la pertinence de l'indicateur obtenu, de même que ce dernier s'avère utile pour qualifier et distinguer des configurations temporelles échappant à la seule inspection visuelle.

À partir de deux graphiques simples mais dynamiquement liés, l'utilisateur est donc à même d'appréhender de manière interactive les dimensions spatiale et temporelle. Toutefois, cette approche fondée sur une implication active de l'utilisateur, qui dirige sa souris au gré de ses intuitions, privilégie la quête de configurations locales au détriment d'un mode d'observation plus global. Par ailleurs, construite à partir d'une information individuelle issue d'enquêtes, cette première tentative peine à se libérer de ce niveau d'observation. Or, les comportements individuels de mobilité ne prennent sens que ramenés au territoire.

Des comportements individuels aux palpitations du territoire

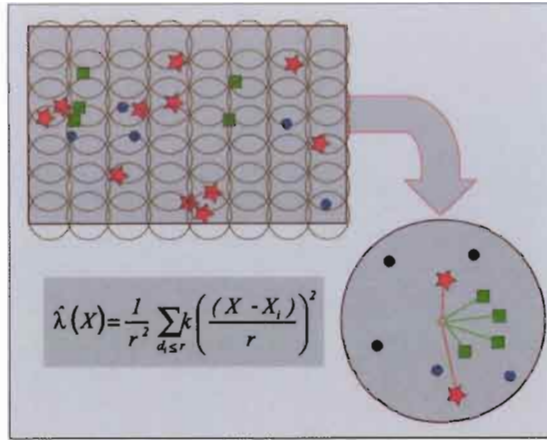
Les propositions méthodologiques et techniques émises au cours des développements précédents autorisent la création d'espaces virtuels multi-dimensionnels, aptes à être explorés visuellement. Ces capacités nouvelles de déambulation spatiale favorisent également la mise en œuvre de modèles plus transparents, mieux maîtrisés et au final plus efficaces. Les opportunités créées par la production d'une information spatiale désagrégée sont également considérables, au point d'autoriser une modification significative des logiques d'investigation elles-mêmes. La dimension spatiale ne saurait être en effet considérée plus longtemps comme une dimension optionnelle, surtout dans une problématique de transport public. En tant que phénomène s'inscrivant pleinement dans l'espace, la mobilité quotidienne peut et doit être appréhendée à travers le prisme spatial, et ce à l'échelle la plus fine. Cette information individuelle ne prend toutefois sens que ramenée au territoire. Il serait d'ailleurs plus juste de parler de territoires au pluriel, les territoires de la mobilité quotidienne, véritables destinataires du transport public de voyageurs. L'identification fine des « palpitations » de ces territoires, au terme d'une intégration active de la dimension temporelle dans le processus d'investigation, est à ce titre un défi passionnant à relever.

Animer pour révéler

L'adjonction de guides de lecture numériques ne résout pas complètement le problème de la comparaison visuelle de structures spatiales ponctuelles : confronté à une information trop nombreuse et trop progressivement différenciée, l'œil humain n'est plus en mesure d'effectuer correctement son travail d'extraction des structures sous-jacentes. Une procédure de lissage par la méthode des noyaux (Silverman, 1986) permet alors de dégager les structures spatiales significatives de ces semis de points, par la production de surfaces de densité moins bruitées. Cette méthode particulièrement utile, consiste à balayer un espace de référence à l'aide de fonctions de densité tri-dimensionnelles, à même de produire des estimations de densité spatialement différenciées. On retrouve là le principe de la technique des fenêtres spatiales mobiles, illustré par la figure 6. Soit un espace de référence, schématisé ici sous la forme d'un rectangle. Des événements localisés et datés surviennent sur cet espace, représentés au moyen d'objets de forme variable. Chaque objet peut ainsi correspondre à un individu ayant répondu à notre enquête, tandis que la forme indique son horaire d'embauche pour

un jour donné. On quadrille alors cet espace à l'aide de fenêtres mobiles, de rayon r éventuellement variable (fenêtres adaptatives), chaque fenêtre faisant l'objet d'une estimation de densité $\hat{\lambda}$ s'appliquant aux objets contenus dans ce sous-espace formel.

Figure 6 - La méthode des noyaux pour réaliser des séquences cartographiques animées



La distance d_i séparant chaque individu X_i du centre de la fenêtre X est calculée, de manière à introduire une fonction de lissage spatial, ici de type quadratique :

$$k(d_i) = \begin{cases} \frac{3}{\pi} (1 - d_i^2)^2 & \text{si } d_i \leq 1 \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad \text{avec } d_i = \left(\frac{(X - X_i)}{r} \right)$$

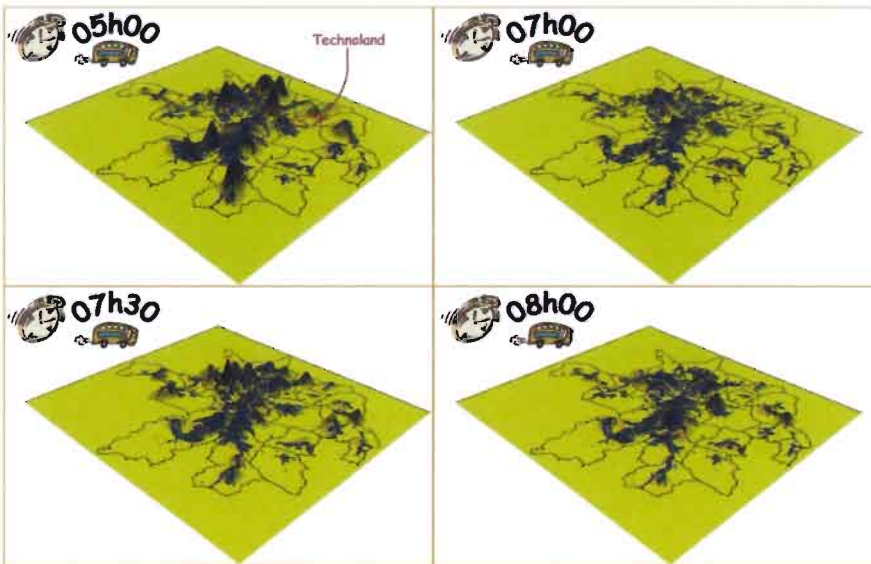
La mesure de densité obtenue pour chaque fenêtre et pour chaque catégorie d'horaire présente est alors stockée sous forme d'un tableau individus-variables (tableau 1).

Chaque centroïde X de fenêtre est ainsi décrit à plusieurs instants T par une mesure de densité, fournissant une information précieuse sur l'éventuelle succession de départs vers Technoland, au cours de la journée, à proximité de ce point. Une carte lissée peut alors être réalisée pour chaque instant T choisi, et représentée en deux ou trois dimensions. Nous avons retenu ici une représentation en trois dimensions, pour ses capacités d'évocation indéniables. Cette solution permet en effet de représenter de manière frappante les « palpitations territoriales » au cours de la journée, en conférant à ce territoire une capacité de déformation proportionnelle à l'intensité des mouvements dont il est le support. Quelques configurations intéressantes ont été extraites de cette animation², afin d'illustrer ici l'intérêt de la méthode (figure 7).

Tableau 1 - Des individus à l'espace

	T	T + 1	T + 2	...	T + N	Σ
Fenêtre mobile 1
Fenêtre mobile 2
Fenêtre mobile 3
...
Fenêtre mobile N
Σ	$\Sigma\Sigma$

Figure 7 - Révéler les « palpitations » du territoire (en fond, le bâti et les limites communales)



Les cartes sont représentées à la même échelle, si bien que les pics de 5h et 7h30 apparaissent comme particulièrement impressionnants. Confronté à cette succession de cartes, le praticien du transport public ne peut éviter de se poser la question du fonctionnement de son service. La complexité des configurations spatio-temporelles est en effet mise en exergue au lieu d'être réduite, comme souvent, pour des raisons opérationnelles. Sur cet exemple, l'animation suggère la mise en place de service souples, seuls à même de satisfaire une demande s'exprimant de manière discontinue et irrégulière, à la fois dans l'espace et dans le temps. Toutefois, la visualisation – physiquement passive mais cérébralement active – d'animations spatio-temporelles ne saurait constituer une fin en soi. Il s'agit également de permettre à l'utilisateur d'explorer, de tester et de vérifier toutes les idées qui ont pu émerger au cours de ce processus.

² L'animation complète, finalisée sous Map-Info pour le rendu en trois dimensions, est disponible à l'adresse suivante : <http://www.univ-pau.fr/~banos/banos.html>

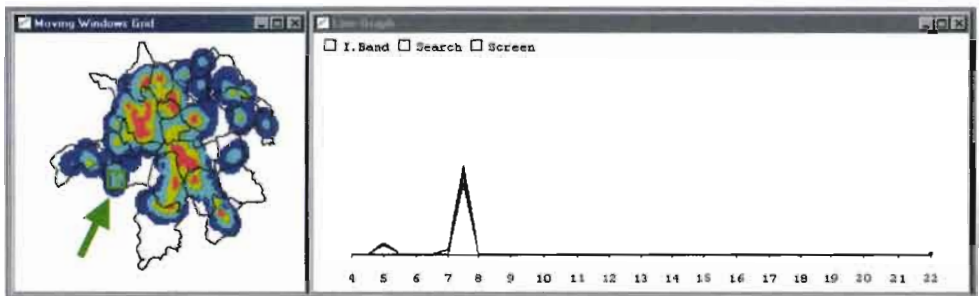
De l'observation à l'action

L'animation a ses vertus. Cependant, elle implique une faible interactivité avec l'utilisateur, condamné à visualiser un phénomène sans pouvoir interagir avec le processus en cours. Or, l'expérience montre que de multiples hypothèses embryonnaires sont formulées au cours de la visualisation d'une animation : comment, dès lors, exploiter cette richesse pour le moins fragile et fugace ? Bien entendu, il est toujours possible de rendre l'utilisateur maître du déroulement même de l'animation, en lui permettant des retours en arrière, arrêts sur image et autres défilements en boucle. Il est toutefois possible d'offrir davantage : comment faire moins en effet que de proposer à l'utilisateur de tester lui-même ses idées, en interagissant directement avec l'information disponible ?

Dans cet esprit, nous proposons un nouvel outil de navigation spatio-temporelle. La figure 8 illustre le principe de cet outil très simple, qui donne à l'utilisateur un pouvoir d'investigation accru. Le raisonnement s'appuie ici sur un support territorial agrégé, enregistrant des intensités d'événements au cours du temps. On notera que la procédure de lissage de l'information, si elle induit une dégradation qualitative inévitable des points de détail, conduit en revanche à une mise en valeur améliorée des structures d'ensemble.

Figure 8 - Naviguer dans l'espace et dans le temps

(en abscisse, les heures de la journée ; en ordonnée, la densité locale de départs vers Technoland)



Cet instrument de navigation se compose de deux graphiques dynamiquement liés, exploitant l'information contenue dans le tableau individus-variables (tab. 1). Il ne s'agit plus toutefois de faire évoluer le document cartographique en fonction de l'information temporelle disponible, mais de permettre à l'utilisateur de naviguer dans sa zone d'étude, à la découverte des configurations dévoilées au cours de l'étape d'animation. Le semis de points composant la carte n'est autre que le semis des fenêtres circulaires utilisées précédemment, coloriées en fonction d'un critère simple : la somme des densités horaires locales de clients. Cette colorisation permet de qualifier utilement la zone d'étude et d'éviter ainsi une navigation spatiale en aveugle. Pour chacun des points de ce semis, nous avons calculé précédemment une densité de clients par tranche horaire d'une demi-heure. Cette information est représentée en parallèle sur le graphique de droite. Les heures de la journée figurent en abscisse (de 4h du matin à 22h), tandis que la densité de clients est représentée par l'axe des ordonnées. Précisons ici que les densités ont été au préalable ré-exprimées sous une forme logarithmique, de

manière à réduire l'écart entre les valeurs et permettre ainsi la visualisation de leurs composantes les plus faibles.

Les bases de la navigation spatio-temporelle ainsi posées, il ne reste plus qu'à en trouver le vecteur. Une fois de plus, la souris est un candidat idéal : on remarquera, sur la partie Ouest de la carte, un petit carré vert sur la commune de Voujeaucourt. Cet objet graphique, ajouté *a posteriori* pour des raisons de lisibilité, indique l'endroit où l'utilisateur a arrêté sa souris. Les points du semis situés à l'intérieur de la zone de sélection graphique de la souris sont sélectionnés, et leur information temporelle représentée sur le graphique associé. Précisons que ce processus d'affichage se réalise de manière continue, au fur et à mesure du déplacement de la souris. La distribution temporelle associée nous indique ici que les fenêtres mobiles sélectionnées enregistrent des horaires d'entrée au travail très concentrés, à 5h et 7h30 du matin. Bien entendu, ce type de configuration idéale ne se retrouve pas partout. Ainsi, sur la figure 10 sont représentées deux configurations temporelles différentes, associées respectivement au sud et au nord de la commune de Montbéliard. Si le graphique inférieur révèle une configuration bimodale comparable – bien que d'intensité supérieure – à celle de la figure 8, le graphique supérieur décrit, quant à lui, une plus grande diversité d'horaires d'embauche. On remarquera une très forte concentration d'individus enquêtés commençant à travailler à Technoland à 5h et 7h30, et des pics moins prononcés à 9h, 12h et 21h.

L'utilisateur peut ainsi déambuler à son gré, recherchant, vérifiant et évaluant les intuitions générées au cours de l'étape d'animation de cartes. Au-delà, l'adjonction d'une option supplémentaire permet de faire de cet outil de navigation un outil de formulation de requêtes complexes. Une question naturelle que l'on est amené à se poser, à la lecture des figures 8 et 9, concerne en effet la présence éventuelle de configurations temporelles proches en d'autres lieux du territoire étudié. Il est évident qu'une recherche manuelle serait fort coûteuse en temps et en énergie, suggérant la mise à disposition d'une procédure de recherche automatisée. L'opération intellectuelle suggérée ici relève d'une logique de requête : il s'agit de rechercher toutes les configurations temporelles strictement identiques ou très proches d'une configuration de référence. Trois particularités doivent toutefois être soulignées. En premier lieu, la logique de requête est ici délibérément abductive : l'utilisateur observe des phénomènes qu'il aurait sans doute du mal à décrire (ou même à imaginer) *a priori*, et cherche ensuite à déterminer leur occurrence spatiale. En second lieu, la solution proposée cherche à identifier des configurations « plus ou moins » proches d'une situation de référence. Or, comment formaliser ce besoin d'une certaine forme de « flou » ? Enfin, la procédure de formulation de la requête est exclusivement graphique.

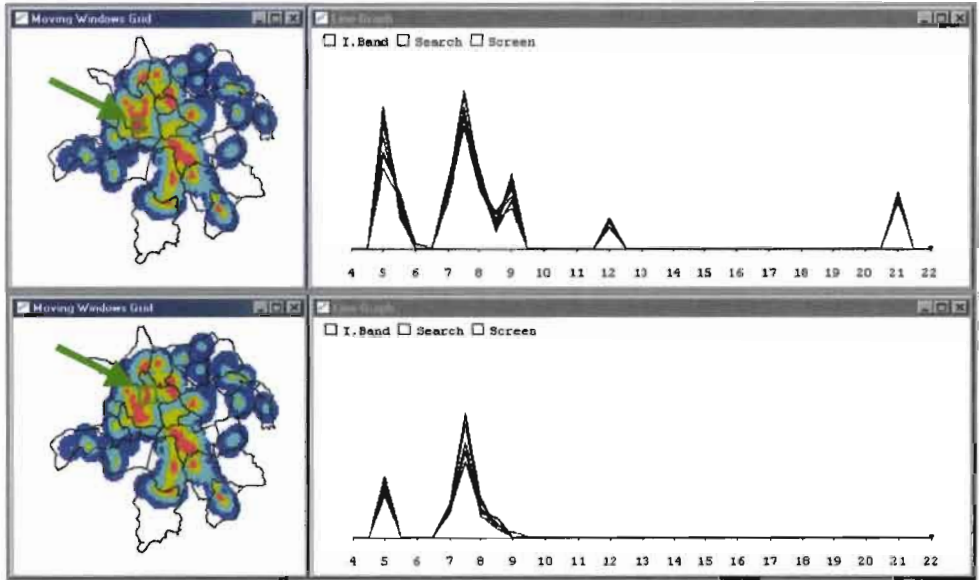
Ce point de vue est fort différent de celui sous-jacent au fonctionnement des SIG classiques, pour lesquels la logique de requête peut être qualifiée de :

- déductive (l'utilisateur doit savoir précisément ce qu'il recherche, de manière à pouvoir l'exprimer) ;
- abstraite (le langage fonctionnel de formulation des requêtes, même doublé d'interfaces conviviales, reste abstrait) ;

- complexe (la formulation *a priori* de requêtes complexes est un défi majeur pour la plupart des utilisateurs).

La figure 9 illustre la solution retenue : elle permet de formuler graphiquement des requêtes à la fois complexes et floues.

Figure 9 - Une capacité d'investigation fine à l'échelle intra-urbaine
(en abscisse, les heures de la journée ; en ordonnée, la densité locale de départs vers Technoland)

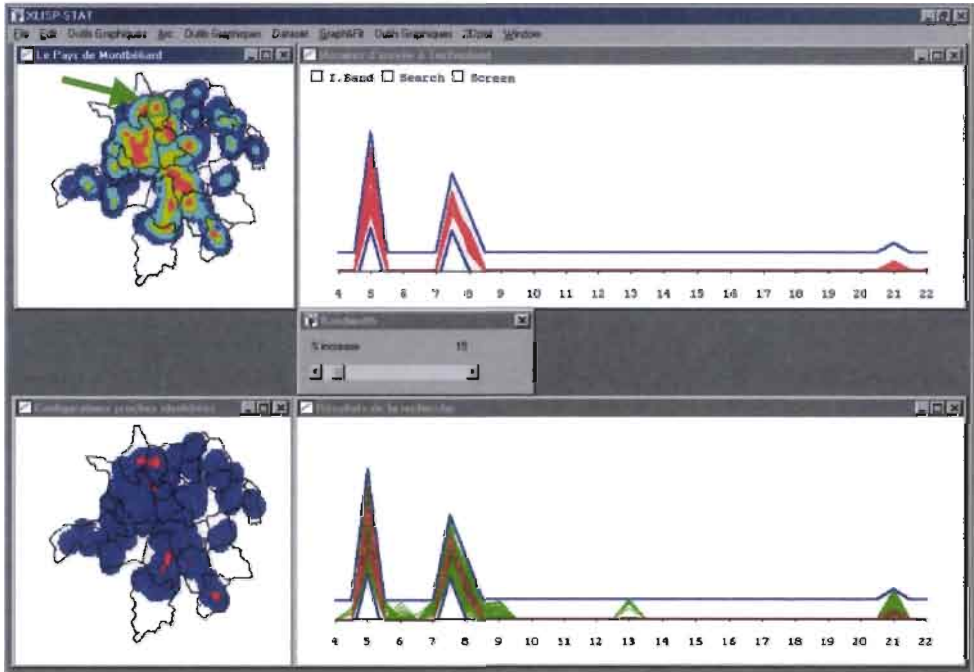


Les deux graphiques supérieurs décrivent le processus de formulation de la requête, tandis que les graphiques inférieurs en exposent les résultats. La zone de sélection correspond à la commune de Grand-Charmont, au nord de la Communauté d'Agglomération. La distribution temporelle observée est simple, avec un pic majeur à 5h, un pic moindre à 7h et un petit pic à 21h. L'utilisateur sélectionne cette distribution temporelle, considérée comme situation de référence, qui prend alors une couleur rouge. Puis, en cliquant sur le menu supérieur du graphique (« I-Band »), il fait apparaître un curseur. Ce curseur permet de définir de manière interactive et dynamique une bande de sélection de part et d'autre de la distribution de référence, formalisant ainsi très simplement et de manière exclusivement graphique ce que l'utilisateur entend par « plus ou moins proche ».

Une fois la requête formulée, la procédure de recherche est activée par le bouton « Search ». Les résultats sont présentés sous deux formes (graphiques inférieurs). Apparaissent en vert toutes les distributions contenues dans la bande de sélection définie. À quelques détails près (fluctuations locales autour de 6h, 9h et 13h), ces distributions ressemblent de très près à notre situation de référence, à la fois en terme de forme et d'intensité. La carte de gauche identifie alors en rouge les fenêtres mobiles concernées.

On notera Grand-Charmont, mais également Béthoncourt au nord, Hérimoncourt au sud et Valentigney au centre.

Figure 10 - De la navigation à la formulation de requêtes spatiales complexes (en abscisse, les heures de la journée ; en ordonnée, la densité locale de départs vers Technoland)



Conclusion

Des stratégies d'investigation abductives, impliquant directement l'utilisateur dans le processus d'analyse de ses données, peuvent aujourd'hui être imaginées et réalisées, au sein d'environnements informatiques ergonomiques. Il ne s'agit pas de renouveler ou d'améliorer le dialogue homme-machine, mais simplement de reconnaître et d'exploiter au mieux les capacités et compétences de chacun. Si l'ordinateur offre des capacités de calcul considérables, le plus évolué des programmes informatiques est encore loin de délivrer les clés d'interprétation des résultats, qu'ils soient sous forme graphique ou numérique. Cette exclusion de la machine du champ sémantique est cependant trompeuse : la manipulation des données et leur interprétation sont en effet deux activités étroitement liées, interdépendantes, aptes à s'enrichir mutuellement. Nous avons ici privilégié une approche graphique, interactive et progressive, largement fondée sur la capacité de l'utilisateur à s'étonner, mais également sur sa capacité à identifier visuellement des structures locales parfois complexes. Ce dernier point est pourtant délicat : cette capacité est-elle équivalente, d'un utilisateur à l'autre ? A quel degré de complexité faisons-nous référence ? Est-il efficace, souhaitable, ou même

logique de laisser en permanence l'utilisateur accomplir cette tâche, même en lui fournissant des guides de lecture complémentaires comme nous avons tenté de le faire ? Si nous avons jusqu'ici raisonné – par commodité plus que par conviction – sur la base d'un utilisateur moyen théorique, il semble donc urgent de mener une réflexion de fond sur les modalités d'appropriation de tels outils et sur leurs implications en termes de culture scientifique et donc de formation.

Références bibliographiques

- BACON F. *Essais*, Paris, Aubier, Editions Montaigne, 1940 (1597), 312 p.
- BANOS A. *Une stratégie d'exploration spatio-temporelle des flux pendulaires. Application à la desserte d'une zone industrielle*, Revue Internationale de Géomatique, 2002, Vol. 12, n° 2, p. 225-244
- BANOS A. *Enhancing mobility behaviour analysis using spatial interactive tools and computer intensive methods*, Geographic Information Sciences, 2001a, Vol. 7, n° 1, p. 35-41
- BANOS A. *Le lieu, le moment, le mouvement : pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain*, Thèse de géographie, Besançon : Université de Franche-Comté, 2001b, 356 p.
- BANOS A. *À propos de l'analyse exploratoire des données*, Cybergéo <http://www.cybergeopresse.fr>, n° 197, 2001c, 15 p.
- BANOS A. *Quelle implication de l'utilisateur dans une stratégie de data mining spatial ? Illustration à partir de l'appréhension spatio-temporelle des accidents de la route en milieu urbain*, Revue Internationale de Géomatique, 1999, Vol. 9, n° 4, pp. 441-456
- BESSE J.M. *Problèmes épistémologiques de l'explication*, Actes du colloque Géopoint 2002, Avignon, p. 11-18
- BOOTS B., GETIS A. *Point pattern analysis*, Newbury Park, Sage Publication, 1988, 93 p.
- BRUNSDON C., *The comap : exploring spatial pattern via conditional distributions*, Computers, Environment and Urban Systems, 2001, Vol. 25, pp. 53-68
- BRUNSDON C. *Exploratory spatial data analysis and local indicators of spatial association with Xlisp-Stat*, The Statistician, 1998, Vol. 47, n° 3, p. 471-484
- BRUNSDON C., FOTHERINGHAM S., CHARLTON M. *Geographically weighted regression : a method for exploring spatial non-stationarity*, Geographical analysis, 1996, Vol. 28, n° 4, p. 281-298
- CHONG HOY. *Abduction ? Deduction ? Induction ? Is there a logic of exploratory data analysis ?*, Annual Meeting of American Educational research Association, New Orleans, 1994, 12 p.
- CLARK P., EVANS P. *Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations*, Ecology, 1954, Vol. 35, p. 445-453
- FOTHERINGHAM S. *Trends in quantitative methods : stressing the local*, Progress in Human Geography, 1997, Vol. 21, n° 1, p. 88-96
- FOTHERINGHAM S. BRUNSDON C. CHARLTON M. *Quantitative geography : perspectives on spatial data analysis*, London, Sage Publications, 2000, 269 p.
- HASLETT J., BRADLEY R., CRAIG P., UNWIN A., WILLS G. *Dynamic graphics for exploring spatial data with application to locating global and local anomalies*, The American Statistician, 1991, Vol. 45, p. 234-242

- JOSELIN D. *Spatial Data Exploratory Analysis and Usability*, Codata 2003,, Data Science Journal, http://journals.eecs.qub.ac.uk/codata/Journal/contents/2_03/2_03pdfs/DSS2.pdf
- JOSELIN D. *À la recherche d'objets géographiques composites avec le prototype ARPEGE*, Revue Internationale de Géomatique, 1999, Vol. 9, n° 4, p. 489-505
- KRAAK M.J. *The cartographic visualisation process : from presentation to exploration*, The Cartographic Journal, 1998, Vol. 35, n° 1, p. 11-15
- KWAN M. *Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographical information systems : a methodological exploration with a large data set*, Transportation Research C, 2000, Vol. 8, p. 185-203
- LADIRAY D. *L'AED, analyse exploratoire des données*, Courrier des Statistiques, 1999, n° 90, p. 3-6
- LEGUEN M. *John Wilder Tukey*, Courrier des Statistiques, 1999, n° 90, p. 11-12
- MONMONIER M. *Geographic brushing, enhancing exploratory analysis of the scatterplot matrix*, Geographical Analysis, 1989, Vol. 21, pp. 81-84
- OPENSHAW S. *Developping automated and smart spatial pattern exploration tools for geographical information systems applications*, The Statistician, 1995, Vol. 44, n° 1, pp. 3-16
- PEIRCE C.-S. *À la recherche d'une méthode*, Paris, Editions Théétète, 1993 (1893), 229 p.
- PHIPPS M. *Entropy and community pattern analysis*, Journal of Theoretical Biology, 1981, Vol. 93, p. 253-273
- POPPER K. *La connaissance objective*, Paris, Flammarion, 1991, 578 p.
- PUMAIN D., SAINT-JULIEN T. *L'analyse spatiale : localisations dans l'espace*, Paris, Armand Colin, 1997, 167 p.
- SCHLANGER J. *La pensée inventive*, In : STENGERS I, SCHLANGER J. *Les concepts scientifiques : invention et pouvoir*, Paris, Gallimard, 1991, 190 p.
- SILVERMAN B. *Density estimation for statistics and data analysis*, London, Chapman and Hall, 1986, 322 p.
- TIERNEY L. *Lisp-Stat : an object-oriented environment for statistical computing and dynamic graphics*, New-York, John Wiley & Sons, 1990, 397 p.
- TUKEY J.-W. *A conversation with John W. Tukey*, In : BRILLINGER D., FERNHOLZ L., MORGENTHALER S., *The practice of data analysis : essays in honor of John Tukey*, 1997, p. 26-45
- TUKEY J.-W. *Exploratory data analysis as part of a larger whole*, In : *The Collected Works of John Tukey*, Vol. IV, 1986, pp. 793-804
- TUKEY J.-W. *Exploratory data analysis*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1977, 688 p.
- TUKEY J.-W. *Analysing data : sanctification or detective work ?*, The American Psychologist, 1969, Vol. 24, p. 83-91
- UNWIN A. *Using your eyes – making statistics more visible with computers*, Computational Statistics and Data Analysis, 2000, Vol. 32, pp. 303-312
- UNWIN A., UNWIN D., FISHER P. *Exploratory spatial data analysis with local statistics*, The Statistician, 1998, Vol. 47, n° 3, p. 415-42
- YAGLOM A. et YAGLOM I. *Probabilité et information : théorie et application*, Paris, Dunod, 1969, 320 p.
- ZEITOUNI K., YEH L. *Le data mining spatial et les bases de données spatiales*, Revue Internationale de Géomatique, 1999, Vol. 9, n° 4, p. 389-423

Liste des posters

Dynamique spatiale de la population américaine de 1990 à 2000

Dominique Luis, Laurent Ngin, DESS géomatique, Université d'Orléans

Évolution du bâti et des Infrastructures sur le campus universitaire de 1963 à 2001

Promotions 2001, 2002 et 2003 du DESS géomatique, Université d'Orléans

La télédétection un outil de recherche, de suivi et de gestion de l'environnement.

François-Pierre Engel, Samuel Volet, DESS géomatique, Université d'Orléans

Répartition des services de santé et accès aux soins en Région Centre.

Sandrine Tous, Fabien Perouchine, Thierry Touzet, DESS géomatique, Université d'Orléans

Occupation du sol et dynamique urbaine autour de l'étang de Thau par télédétection.

Sandrine Tous, David Chev , DESS géomatique, Université d'Orléans

Environnement et urbanisme indirect Aménagement et « mémoire » de l'utilisation du sol

Mélanie Tran : IGN

SIG et 3e dimension pour l'analyse diachronique d'un paysage périurbain :
les collines de Bellet   Nice.

Samuel Robert : UMR 6012 Espace NICE

Projet SeAGeRH : Service d'aide   la gestion des ressources halieutiques

Martin Desruisseaux, Maison de la Télédétection - Unité S140 ESPACE - IRD Montpellier

Florence Lahet, Maison de la Télédétection - Unité S140 ESPACE - IRD Montpellier

Michel Petit, Maison de la Télédétection - Unité S140 ESPACE - IRD Montpellier

Christophe Boschet, Maison de la Télédétection - Unité S140 ESPACE - IRD Montpellier

Philippe Gaspar, Collecte Localisation Satellites (DOS), 8-10 rue Hermès - 31526 Ramonville

Projet AGIL : Aide   la gestion intégrée des littoraux

Marc Lointier, Maison de la Télédétection - Unité S140 ESPACE - IRD Montpellier

Laurent Durieux, Maison de la Télédétection - Unité S140 ESPACE - IRD Montpellier

Gilbert David, Unité S140 ESPACE - IRD Orléans

Apport d'un SIG à la cartographie des paysages en milieux arides : la région de Menzel Habib
face aux risques de désertification (Tunisie méridionale)

Eric Dela tre, ROSELT - Maison de la Télédétection Montpellier

Aziza Ghram Messedi, ROSELT - Maison de la Télédétection Montpellier

Hédi Ben Oueddou, ROSELT - Maison de la Télédétection Montpellier

La télédétection et les SIG : l'apport concret à l'étude et à la gestion des pâturages andins de la
IV  région du Chili

Héctor Reyes, Depto. de Agronomía, U. de La Serena, Chile

Pablo Alvarez, Depto. de Agronomía, U. de La Serena, Chile

Rodomiro Osorio, Depto. de Biología, U. de La Serena, Chile

Yveline Poncet, IRD Orléans, France

Télédétection et analyse multi-échelle des tepetates et sols dégradés du Nord Michoacan
(Mexique)

Alice Servenay, Maison de la Télédétection - Unité S140 ESPACE - IRD Montpellier

Jean-Marie Fotsing, Université d'Orléans - Unité S140 ESPACE – IRD Orléans

Jacques Hubschman, Laboratoire GEODE - Université Toulouse Le Mirail

SAGE : Un système d'information pour la gestion durable de la lentille d'eau de Lifou (Nouvelle-Calédonie)

Jean-Marie Fotsing, Université d'Orléans - Unité S140 ESPACE – IRD Orléans

David Huaman, Unité S140 ESPACE – IRD Orléans

Gilbert David, Unité S140 ESPACE – IRD Orléans

Didier Lille, Unité S140 ESPACE – IRD Nouméa

Télédétection et SIG pour l'analyse géologique et la détermination des risques dans la vallée du Colca (Pérou)

David Huaman, Unité S140 ESPACE – IRD Orléans

Juan Carlos Gomez, Institut Geographico del Peru,

Jean-Marie Fotsing, Université d'Orléans - Unité S140 ESPACE – IRD Orléans

Note : Les résumés élargis des posters sont publiés dans les numéros 3 et 4 des Cahiers géomatiques d'Orléans.

Liste des participants

NOM	Adresse professionnelle
ALVAREZ Pablo	Depto. de Agronomía, U. de La Serena, Ovalle, IV ^e Región, Chile
AMARY Alexandre	DESS géomatique, Université d'Orléans
ANGEL Jean-Michel	BRGM
ARIANO Sara	Université Paris IV
BANOS Arnaud	Université de Pau
BEAULIER Aurélie	Université d'Orléans
BEAUJOUAN Véronique	INH - Département paysage Angers
BRIDIER Sébastien	Université de Provence Aix-Marseille I
CANIVÉ Jérôme	Centre de Biogéographie-écologie de l'ENS LSH et Association ADREE
CHEVÉ David	DESS géomatique, Université d'Orléans
DAVID Gilbert	IRD US Espace Orléans
de BLOMAC Françoise	SIG la lettre
DELAITTE Eric	IRD Montpellier
DEVAUX Nicolas	Doctorant - Cemagref UMR3S/ADEME/EDF
DUMAS Pascal	IRD US Espace Nouméa
DUMON Yohan	DESS géomatique, Université d'Orléans
DURIEUX Laurent	IRD US Espace
ENGEL F.-Pierre	DESS géomatique, Université d'Orléans
FONT Françoise	SIG BEA St Jean-de-Braye 45
FOTSING Jean-Marie	Université d'Orléans
FOURMANOIR Mélanie	DESS géomatique, Université d'Orléans
GALINIÉ Henri	UMR 6575, Archéologie et Territoires, Université de Tours
GANZIN Nicolas	Groupement Développement de la télédétection aérospatiale (GDTA)
GHRAM MESSEDI Aziza	Université Tunis
GRENANT Françoise	IRD Orléans
HUAMAN David	IRD US Espace
HUYNH Frédéric	Maison de la télédétection, IRD US Espace, Montpellier
JANVIER Frédéric	SIG BEA St Jean-de-Braye 45
JOLIVEAU Thierry	CRENAM-UMR 5600-Université Jean Monnet
JOSELIN Didier	UMR ESPACE, CNRS, équipe d'Avignon
LA JEUNESSE Isabelle	Université catholique de Louvain-la-Neuve, Belgique
LAHET Florence	Maison de la télédétection, Montpellier
LANDRY Philippe	Office national de la chasse et de la faune sauvage 78 Auffargis
LAOUAR Ridda	Université de Valenciennes LAMIH
LE PAPE Olivier	DRV/RH- ECOHAL, IFREMER, Nantes
LECLERC Eric	Université de Rouen UMR IDEES 6063 équipe Ledra
LIEFOOGHE Christine	UFR de géographie Lille 1
LILLE Didier	IRD US Espace, Nouméa
LOINTIER Marc	Maison de la télédétection, Montpellier
LUIS Dominique	DESS géomatique, Université d'Orléans
MACARY Francis	Cemagref de Bordeaux
MAILLARDET Joelle	Université d'Orléans
MATHIAN Hélène	CNRS UMR Géographie-Cités, Paris
MAUREL Pierre	Maison de la télédétection, Montpellier

MIRLOUP Joël	Université d'Orléans
MISSOUMI A	Centre National des Techniques Spatiales, Algérie
MOTET Serge	IGN
MULAMA Martin	Kenia Wildlife Service, Nairobi, Kenya
NGIN Laurent	DESS géomatique, Université d'Orléans
NOUCHER Mathieu	DESS géomatique, Université d'Orléans
ORRU Jean-François	BRGM
OUTRACHT Nicolas	UMR LET CNRS Lyon
PELLISSIR Isabelle	US Espace, IRD Montpellier
PEREIRA Paolo	Université d'Orléans
PETIT Michel	IRD US Espace Montpellier
PERROUCHINE Fabien	DESS géomatique, Université d'Orléans
PEYRUSAUBES Daniel	Laboratoire ICITEM Université de Poitiers
PIROT Françoise	Centre de Compétences thématiques CNRS, (CEIAS – UMR 8564).
POYET Jean-François	DESS géomatique, Université d'Orléans
PLATEAU Emmanuelle	SIG BEA St Jean-de-Braye 45
PONCET Yveline	IRD Orléans
QUÉNOL H.	Université des sciences et technologies de Lille
QUODVERTE Philippe	Université d'Orléans
REYES Héctor	Depto. de Agronomía, U. de La Serena, Ovalle, V ^e Región, Chile
ROBERT Samuel	UMR 6012 Espace, Nice
RODIER Xavier	UMR 6575, Archéologie et Territoires, Université de Tours
ROGRIGUEZ-A. Adriana	Orléans
RUELLELAND Denis	CNRS, UMR6590 – ESO 72085 Le Mans
SAGLIER Anne	Université d'Orléans
SAIDI Ahmed	Centre National des Techniques Spatiales, Arzew, Algérie
SAJALOLI Bertrand	Centre de biogéographie-écologie (ENS LSH) et Université d'Orléans
SCHNEIDER Marc	CEPS - INSTEAD Differdange Luxembourg
SOTO Gerardo	Université La Serena, Chili
SOYER Patrick	DESS géomatique, Université d'Orléans
THULIE Arnaud	ADREE
TOUS Sandrine	DESS géomatique, Université d'Orléans
TOUSTOU Pascal	GDTA
TOUZET Thierry	Inventaire Forestier National Orléans
TRAN Mélanie	IGN
TRAN Thao	DEA HETRE (Universités de Paris I et IV, ENS LSH) et U.Orléans
TRÉMÉLO Marie-Laure	CNRS UMR 5600 Environnement-ville-société, Université Lyon 2
TUFFERY Christophe	ESRI France 92190 Meudon
VARET-VITU Anne	Centre de Recherches Historiques, (CNRS/EHESS – UMR 8558)
VELCHE Anne	Architecte paysagiste
VIDAL Max	Université d'Orléans
VIOVI Arnaud	IRD Orléans
VOLET Samuel	DESS géomatique, Université d'Orléans
YENGUÉ Jean-Louis	Université de Tours
ZADORA-RIO Elisabeth	UMR 6575, Archéologie et Territoires, Université de Tours
ZANINETTI Jean-Marc	Université d'Orléans
ZIEGLER Raphaëlle	IRD Orléans

Table des figures

Les SIG dans la recherche scientifique

Les Systèmes d'information géographique : place et évolution dans les disciplines et la communication scientifiques

1 - Évolution du nombre d'articles ayant un lien direct ou indirect avec les SIG	23
2 - Évolution du nombre annuel d'articles ayant un lien direct ou indirect avec les SIG	25
3 - Évolution du nombre d'articles dans les disciplines fortement liées aux SIG	27
4 - Évolution du nombre d'articles dans les disciplines faiblement liées aux SIG	28

Les SIG dans la recherche française en géographie. Bilan et questions

1 - Nombre de citations de différents mots clés dans les Répertoires des géographes	38
2 - Les mots clés « Cartographie automatique » et « SIG » dans le Répertoire des géographes.	39
3 - Pourcentage des communications sur le thème des SIG aux colloques ECGT	40
4 - Nombre d'articles dans des revues de géographie portant le mot-clé SIG	41
5 - Thèses de géographie soutenues mentionnant le mot SIG	42
6 - Nombre d'articles SIG par grands domaines disciplinaires	44
7 - Nombre d'articles SIG par domaines de la géographie	45
8 - Finalité de l'article	45
9 - Point de vue adopté sur les SIG	46
10 - Fonctions SIG	47

Pluridisciplinarité et géomatique. Retour sur expérience

1 - Transdisciplinarité	59
2 - Interdisciplinarité	60
3 - Polydisciplinarité	60
4 - Pluridisciplinarité	61
5 - Phase 1 de la mise en place du TAD Evolis-gare : conception du service	66
6 - Phase 2 de la mise en place du TAD Evolis-gare : réalisation du produit	67
7 - Phase 3 de la mise en place du TAD Evolis-gare : évaluation de l'extension géographique ...	68

Les SIG dans les sciences environnementales et appliquées

Essai de délimitation de la partie terrestre du littoral à l'aide d'un SIG : Application à la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie)

1 - Carte de situation de la Nouvelle-Calédonie	80
2 - Modèle paysager 3D réalisé par drapage de l'image satellite sur le MNT (exagération X 2, région de Tontouta)	85
3 - Zone de 5 km du trait de côte superposée à l'image satellite	86
4 - Zones littorales potentielles	87
5 - Mise en évidence du critère végétation et de l'occupation du sol avec la topographie à partir de l'image satellite	88

The use of GIS for a quantitative description of essential fish habitats in the Bay of Biscay (France)

1 - The Bay of Biscay, showing the main rivers, the 100 and 500 m isobaths, the limits of the study area and the divisions between the coastal sectors used in the analysis	95
---	----

2 - Fitted y-o-y sole abundance for mean hydrologic conditions in the study area	99
3 - Contribution (% of total juveniles in the study area) of the different habitats according to bathymetry (a) and sediment structure (b).....	100
4 - Contribution (% of total juveniles in the study area) of estuarine and non-estuarine waters (bar: upper and lower quartiles; whiskers: extreme values; bold line: median value)	101
GIS-based tools in a decision support system for the integrated management of water resources at the catchment's scale	
1 - Structure of the MULINO-DSS	108
2 - The belgian case study of the MULINO project : the Dyle catchment	110
3 - Representation of the central position of GIS-based techniques in the MULINO-DSS too... ..	113
4 - Scheme of the integration of models outputs in the DPSIR chain linkage.....	114
5 - The workplan of the MULINO project.....	116
Téledétection et SIG : un apport concret à l'étude et à la gestion des pâturages andins dans la IV^e Région du Chili	
1 - Image Landsat TM de la <i>cordillera Carrizal</i>	121
2 - Les unités de sols homogènes de la <i>cordillera Carrizal</i>	125
3 - Formations végétales de la <i>cordillera Carrizal</i>	127
Contribution du SIG à l'élaboration d'une méthode d'aide à la gestion des ressources pastorales pour la faune sauvage du Parc national de Nakuru au Kenya	
1 - Situation de la zone d'étude	134
2 - Production de biomasse estimée pour 6 saisons.....	138
3 - Végétation du Parc National de Nakuru (Classif. d'image SPOT haute résolution)	140
4 - Estimation du couvert ligneux sur photographies aériennes	141
5 - Masques issus de la conversion vecteur-raster	142
6 - Correction des estimations de production de biomasse.....	143
7 - Exemples de résultats corrigés	144
Application du SIG en climatologie locale : exemples sur les remblais des lignes à grande vitesse (TGV)	
1 - Simulation du lac d'air froid sur le site de Vrigny après l'implantation du remblai ferroviaire de la LGV.....	155
2 - Surface du vignoble où le risque gélif estimé est accentué par la LGV avec un vent de nord	156
3 - Modélisation du mistral aux abords des haies brise-vent avant et après l'implantation du remblai ferroviaire	157
4 - Modélisation spatiale des secteurs agricoles où l'écoulement du mistral est modifié par les haies brise-vent et les infrastructures de la LGV	158
Les SIG dans les sciences humaines et sociales	
Utilisation des SIG en archéologie : application à la topographie historique en Indre-et-Loire (France)	
1 - Les sources potentielles et l'élément constitutif.....	166
2 - L'intégration EC, ECC, Ensembles à un moment T.....	167
3 - La succession des EC en un même lieu	168
4 - Les modifications du trait de rive dans l'ouest de Tours	171
5 - La structure du tissu urbain de Tours d'après le cadastre du XIX ^e s	172

6 - L'épaisseur du dépôt archéologique à Tours	173
7 - Hypothèses de travail pour la Vienne à Mougon	176
8 - Évaluation de la représentativité des sources écrites antérieures à 1200	178
La sémiologie graphique et la conception de cartes thématiques dans les SIG : nouvelles méthodes, nouvelles images	
1 et 2 - Cartes réalisées sur imprimantes non modifiées	185
3 - Carte des environs de Longeville réalisée sur traceur.....	186
4 - La représentation des migrations par des flèches. Exemple de combinaison de variables (forme, taille, orientation, couleur-valeur, ombrage)	196
5 - Carte du relief des environs d'Angoulême. Exemple de combinaison de variable (couleur-valeur, ombrage).....	197
Activité, chômage et territoires en France, analyse spatiale et modélisation locale	
1 - Taux de chômage en France par zone d'emploi 1999 (au sens du recensement).....	205
2 - Corrélogramme taux de chômage 1999 par zone d'emploi.....	207
3 - Coefficients locaux de Moran pour le taux de chômage en France en 1999	208
4 - Taux d'activité des femmes de 25 à 49 ans par zone d'emploi en 1999	210
5 - Répartition des résidus du modèle	212
6 - Résidus du modèle MCO entre chômage et taux d'activité.....	213
7 - Corrélogramme des résidus du modèle	214
8 - Corrélogramme des résidus du modèle GWR.....	214
9 - Relation entre les taux d'activité selon le sexe et l'âge et le taux de chômage.....	216
La difficile intégration des mobilités humaines dans les SIG : comment rendre l'espace nomade ?	
1 - CDV-TS	225
2 - Déplacements le dimanche selon le sexe	228
3 - Déplacements d'un employé de l'informatique	229
4 - Répartition de la population sédentaire.	232
5a - Filières migratoires.....	233
5b - Filières migratoires	234
La voie de l'étonnement : favoriser l'abduction dans les Systèmes d'information géographique	
1 - L'interactivité graphique au service d'une exploration spatio-temporelle	243
2 - Trois semis de points de référence.....	243
3 - Valeur du paramètre α en fonction de l'ordre de voisinage.....	244
4 - Un guide de lecture spatial interactif, mis à jour en temps réel.....	245
5 - S'adjoindre un guide de lecture temporel pour explorer l'espace	246
6 - La méthode des noyaux pour réaliser des séquences cartographiques animées.....	248
7 - Révéler les « palpitations » du territoire (en fond, le bâti et les limites communales)....	249
8 - Naviguer dans l'espace et dans le temp	250
9 - Une capacité d'investigation fine à l'échelle intra-urbaine	252
10 - De la navigation à la formulation de requêtes spatiales complexes	253

Table des matières

Avant Propos et remerciements	3
Introduction, <i>Jean-Marie Fotsing</i>	5
Préface, Françoise de Blomac	11

Première partie Les SIG dans la recherche scientifique

Les systèmes d'information géographique : place et évolution dans les disciplines et la communication scientifiques. <i>Jean-Marie Fotsing, Nicolas Devaux</i>	17
Les SIG dans la recherche française en géographie. Bilan et questions. <i>Thierry Joliveau</i>	35
Pluridisciplinarité et géomatique. Retour sur expérience. <i>Didier Josselin</i>	57

Deuxième partie. Les SIG dans les sciences environnementales et appliquées

Essai de délimitation de la partie terrestre du littoral à l'aide d'un SIG : Application à la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie). <i>Pascal Dumas, Jean-Marie Fotsing, Gilbert David</i>	77
The use of GIS for a quantitative description of essential fish habitats in the Bay of Biscay (France). <i>Olivier Le Pape, Florence Chauvet, Jean-Marie Fotsing</i>	93
GIS-based tools in a decision support system for the integrated management of water resources at the catchment's scale. <i>Isabelle La Jeunesse., Mark . Rounsevell, Marnik. Vanclooster, Agnieska Romanowicz</i>	105
La Télédétection et les SIG : un apport concret à l'étude et à la gestion des pâturages andins dans la IV ^e Région du Chili <i>Héctor Reyes, Pablo Alvarez, Rodomiro Osorio, Yveline Poncet, Tchansia S. Kone</i>	119
Contribution du SIG à l'élaboration d'une méthode d'aide à la gestion des ressources pastorales pour la faune sauvage du parc national de Nakuru au Kenya <i>Nicolas Ganzin, Jean-Marie Fotsing, Pascal Toustou, Martin Mulama</i>	131
Application du SIG en climatologie locale : Exemples sur les remblais des lignes à grande vitesse (TGV) <i>Sébastien Bridier, Hervé Quénot, Gérard Beltrando</i>	151

Troisième partie. Les SIG dans les sciences humaines et sociales

Utilisation des SIG en archéologie : application à la topographie historique en Indre-et-Loire (France) <i>Henri Galinié, Anne Moreau, Xavier Rodier, Elisabeth Zadora-Rio</i>	163
La sémiologie graphique et la conception de cartes thématiques dans les SIG : nouvelles méthodes, nouvelles images <i>Philippe Quodverte</i>	183

Activité, chômage et territoires en France, analyse spatiale et modélisation locale <i>Jean Marc Zaninetti</i>	201
La difficile intégration des mobilités humaines dans les SIG : comment rendre l'espace nomade ? <i>Eric Leclerc</i>	221
La voie de l'étonnement : favoriser l'abduction dans les Systèmes d'information géographique <i>Arnaud Banos</i>	237
Liste des posters	256
Liste des participants	258
Table des figures	260

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont de plus en plus utilisés dans les milieux de la recherche scientifique. Outils de gestion des données, ils deviennent aussi des outils d'investigation méthodologique pour les chercheurs qui s'intéressent à l'espace ou aux objets localisés. L'utilisation des SIG dans divers domaines relatifs à l'environnement, aux ressources naturelles et aux territoires, bouleverse les concepts et méthodes d'analyse traditionnelles de plusieurs disciplines, élargissant ainsi leurs champs d'investigation.

Au gré des opportunités, et au regard de la complexité croissante des questions d'environnement, des approches pluridisciplinaires se développent à l'intérieur ou en marge des disciplines, plaçant les SIG au cœur des questions scientifiques. Emergent et se recomposent alors de nouvelles problématiques de recherche et méthodes d'analyse.

Géographes, agronomes, archéologues, historiens, hydrologues, géologues, informaticiens, climatologues tentent de croiser leurs expériences pour tirer le maximum de ces outils de recherche désormais incontournables. À l'intégration et à l'analyse des données spatialisées, répond une démarche pluridisciplinaire et multithématique qui contribue à enrichir une réflexion épistémologique sur ces nouveaux outils.

Les contributions présentées au colloque qui s'est tenu à Orléans en mars 2003 sur le thème « apport des SIG au monde de la recherche », attestent de cette évolution. Elles constituent une étape importante qui montre que les SIG se révèlent être un continuum allant des sciences de l'environnement, aux sciences de l'homme et de la société.

Avec la participation de la ville d'Orléans et du Conseil général du Loiret

