

Rapport scientifique de l'Ecole CIMPA 2008 – Madagascar

MIMOPA, 15-26/09/08, Fianarantsoa

Dominique Hervé et Jean-Pierre Treuil

Fianarantsoa, 24 novembre 2008

I- Antécédents

A Madagascar, cette école CIMPA 2008 s'inscrit dans une lignée d'évènements :

- CARI (Congrès Africain de Recherche en Informatique) 2000, Antananarivo
- EME (Ecole Modélisation Environnement), Antananarivo (IRD-CIRAD) et AMF (Atelier Modélisation Fianarantsoa), Fianarantsoa (IRD-Univ. Fianarantsoa), en septembre 2004
- Accord IRD-CIMPA, 2006
- Projet d'Ecole à Fianarantsoa soumis au CIMPA en 2006
- Ecole CIMPA 2008 à Fianarantsoa, 15-26 septembre 2008.

Cette école CIMPA a été permise grâce à la conjonction des efforts de l'IRD et du CIMPA et, au sein de l'IRD, des efforts de deux unités de recherche, UR199 (Dynamiques socio-environnementales et gouvernance des ressources, Montpellier) et UR079 (Modélisation mathématique et informatique de systèmes complexes naturels, biologiques ou sociaux, GEODES, Bondy). C'est une des premières écoles CIMPA en mathématiques appliquées et la seconde école CIMPA organisée avec l'IRD, après l'Afrique du Sud.

L'idée d'une école d'été sur la modélisation des paysages localisée à Madagascar est née de discussions lors du CARI à Hammamet – Tunisie en novembre 2004. Les représentants de l'IRD faisaient valoir l'intérêt de renforcer l'axe modélisation – simulation de systèmes naturels et sociaux, axe sur lequel l'IRD pouvait apporter sa compétence propre. Ils avaient suggéré que soient organisés à cet effet des ateliers spécialisés, et avancé à titre d'exemple, en relation avec d'autres participants de CARI, deux thèmes, respectivement autour de la modélisation des paysages et des rapports ville -campagne. L'idée de l'atelier sur les paysages localisé à Madagascar a été privilégiée du fait de l'intérêt manifesté par les représentants malgaches au CARI et du fait de la présence à Fianarantsoa d'une équipe de l'IRD animée par Dominique Hervé (UR 168 puis UR199) travaillant sur le thème de la conservation du

corridor forestier de Fianarantsoa et développant des liens avec les mathématiciens et informaticiens de l'Université de Fianarantsoa.

Plus récemment, en 2006, l'IRD et le CIMPA se sont rencontrés au niveau de leurs directions respectives pour convenir de l'intérêt de renforcer leur collaboration de façon importante et en définir les modalités. Un des objets de la collaboration IRD-CIMPA est apparu être l'organisation d'écoles thématiques réunissant spécialistes des domaines scientifiques concernés d'une part, mathématiciens et informaticiens d'autre part. Le projet suggéré en 2004 d'une école IRD-CIMPA sur la modélisation des paysages a naturellement ressurgi car il s'inscrit dans ce projet global. Le choix de Madagascar fournit par ailleurs au CIMPA l'occasion d'initier une action dans un pays nouveau pour lui sur un thème porteur. L'intérêt d'un pays comme Madagascar est de pouvoir se relier d'une part avec des pays africains au Nord ou au Sud du Sahara, et d'autre part avec des pays du sud-est asiatique, en particulier sur les thématiques forestières, grâce à leur appartenance à l'univers francophone. Des réseaux sont en place en Afrique. Madagascar, grâce en partie aux rencontres du CARI, tente de s'y articuler. Des perspectives existent grâce à l'IRD de contacts avec le sud-est asiatique et des contacts anciens avaient été noués entre l'Université de Fianarantsoa et le Vietnam.

Enfin l'association avec le CIMPA et l'organisation d'une école de modélisation prend la suite des actions déjà menées à l'IRD depuis le milieu des années 1990 : création du Laboratoire d'Informatique Appliquée (LIA, Bondy), participation active aux rencontres CARI, Ecoles sur la Modélisation des Systèmes complexes à Orléans, Sessions de l'Atelier de Modélisation Environnementale à Montpellier (AME, NSS Dialogues-IRD-Cirad, 2003-2005), Colloque des 7-9/12/05 à Montpellier de bilan de l'AME, des actions qui ont poussé l'IRD à prendre conscience du développement des Mathématiques et de l'Informatique dans les pays du Sud et à y apporter son appui.

Par ailleurs, ce projet d'école de modélisation est la seconde initiative d'école de modélisation à Madagascar, en alliance avec l'université de Fianarantsoa. Citons la tenue d'une école IRD/Cirad sur la modélisation environnementale, ayant regroupé différentes institutions franco-malgaches à Antananarivo et Fianarantsoa en septembre 2004, et le démarrage de deux thèses en 2006 par des enseignants-chercheurs de l'ENI (Ecole Nationale d'Informatique de l'université de Fianarantsoa), sur la modélisation de la dynamique de l'usage du sol à l'échelle d'un terroir villageois et des communes du corridor forestier de Fianarantsoa.

Cette école CIMPA a eu pour responsables scientifiques les collègues suivants :

Françoise Burel (CNRS, UMR 6553, Univ. Rennes I, France), Pierre Auger (IRD, Directeur UR 079, Geodes, Bondy, France), Lala Andriampianina (Ecole supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo, Madagascar), Bertin Olivier Ramamonjisoa Andriantiana (Coordinateur local de l'école CIMPA et Directeur de l'Ecole Nationale d'Informatique), Jean-Pierre Treuil (IRD, France) et Dominique Hervé (IRD, Fianarantsoa, Madagascar).

II- Montage financier

La proposition d'école a été soumise à CIMPA : « Méthodes mathématiques et informatiques pour la modélisation des paysages » (MIMOPA) avec un renforcement de la partie mathématique. Les contributions financières obtenues, suivies des contributions complémentaires non quantifiées, sont énumérées ci-dessous, par ordre d'importance.

- Contributions de l'**IRD** (13 000 euros) :
10 000 euros obtenus du département DSF,
3000 euros apportés par l'UR 079, l'ensemble étant géré par l'IRD à Antananarivo.
Mission de Pierre Auger financée par l'IRD (UR 079).
Logement de Jean-Pierre Treuil assuré à Fianarantsoa par Dominique Hervé.
Logement d'étudiants et de deux chauffeurs assurés par l'IRD à Fianarantsoa durant l'école.
- Contribution du **CIMPA** (12 000 euros) obtenue par l'IRD et dont la partie affectée à Madagascar a été gérée conjointement par l'IRD et le CIMPA.
Mission de Michel Jambu financée par CIMPA.
Les contributions de l'**ICTP** (3000 euros) et l'**IMU** (745 euros) suggérées par le CIMPA, et obtenues par l'IRD, sont gérées par le CIMPA.
- Contributions de l'**AUF** (5 500 euros) :
4000 euros, 80% puis 20% versés par l'AUF à l'Université de Fianarantsoa ;
1500 euros, déplacement France – Madagascar AR de Jean-Pierre Treuil (mission Senior).
- Contribution du **SARIMA** (4000 euros) obtenue par l'IRD et gérée par l'IRD à Fianarantsoa.
- Apport de l'**INRIA** non quantifié : voyages AR + perdiem pour 2 conférenciers de l'INRIA.
- Apport de l'**ENI** dans l'équipement de la salle de TD en ordinateurs et le câblage pour assurer une connexion internet durant l'école ; apport par **l'Université de Fianarantsoa** du cocktail final.

Nous avons obtenu des réponses négatives aux demandes d'appui financier formulées par le CIMPA et l'IRD à la SCAC et par l'IRD et SARIMA au MADES. De manière générale, le long délai de préparation de cette école (deux à trois ans) a eu pour conséquence que nos interlocuteurs ont été nombreux à changer entre temps, ce qui a rendu particulièrement difficile la reprise de contact et la concrétisation des appuis envisagés, parfois obtenus au dernier moment.

En conséquence, l'école s'est réalisée avec un budget total de 38 245 euros, soit 70% du budget déjà revu à la baisse de 55 000 euros. Par conséquent tous les coûts ont été sérieusement ajustés : perdiem, repas et hôtel négociés au tarif minimum, pas de pochette ni de blocs papiers pour les participants ; le CD-Rom valorisant toutes les productions de l'Ecole a été édité localement en version non interactive et en un nombre limité d'exemplaires.

III- Pourquoi à Madagascar ?

Les questions environnementales liées à la déforestation sont cruciales à Madagascar ; elles concernent la conservation des forêts pour protéger des espèces endémiques qui sont considérées comme un patrimoine de l'humanité, mais en même temps la lutte contre la pauvreté d'une population qui vit dans ou de la forêt et une politique volontariste d'augmentation des surfaces en aires protégées. La Grande Ile est le champ d'une politique active de conservation des forêts et de transfert de sa gestion aux populations riveraines. L'objectif de cette politique est d'assurer une coexistence durable entre une agriculture de rizière et de pente d'une part, un domaine forestier qui soutient une biodiversité en grande

partie endémique d'autre part. Il s'agit là d'une problématique, partagée avec tout le Sud Est Asiatique et l'Indonésie, qui occasionne de vifs débats entre biologistes de la conservation, écologues et agronomes, sur le rôle de l'abattis-brûlis, la vitesse de déforestation, les mesures de conservation à prendre.

Par ailleurs il existe à Madagascar, et en lien avec des universités françaises, un potentiel d'étudiants, d'enseignants et de chercheurs en mathématiques, informatique et statistiques, actuellement en fort développement. Il s'agit alors de renforcer la capacité de ces compétences à s'investir dans les questions d'environnement et de gestion des ressources renouvelables. A terme, cela constitue un enjeu de mobiliser des malgaches formés sur des questions de recherche intéressant directement le développement de leur pays.

Il n'existe pas à Madagascar de filière de formation de géomaticien SIG. La sélection pour cette école a porté sur les départements de géographie, de biologie-écologie végétale (DBEV) et de géophysique (IOGA), et l'école supérieure de sciences agronomiques (ESSA) de l'Université d'Antananarivo et vers des modélisateurs de l'Université de Fianarantsoa (Ecole Nationale d'Informatique pour les informaticiens, département de mathématiques à la faculté des sciences pour les mathématiciens).

Le supposé initial était de réunir des mathématiciens et informaticiens appliqués et des représentants de sciences de l'environnement (écologie, agronomie, géographie) pour lesquels la dimension spatiale était incontournable, dès lors qu'on abordait la gestion des ressources renouvelables. L'école prétendait initier les participants à l'écologie des paysages, avec deux préoccupations :

- Passer des « patatoïdes » des aires protégées à l'analyse de la connectivité entre les paysages forestiers, entre paysages forestiers et cultivés.
- Etablir des ponts entre les transitions entre les états successifs pris par des parcelles issues de forêts (abattis-brûlis) et les dynamiques des paysages en lisière de forêt.

IV- Objectif(s) de l'école

La notion de paysage, dans ses diverses acceptions, intervient dans plusieurs points de vue : Le paysage est d'abord – point de vue des scénarios climatiques – avancé comme une des échelles déterminante pour l'appréhension des dynamiques de la biosphère continentale, intermédiaire entre l'échelle fine d'étude des processus biologiques et les échelles vastes des modèles globaux du système terrestre. C'est également – point de vue de l'écologie des paysages -une notion centrale dans l'évaluation des dynamiques de populations végétales et animales et des risques sur la biodiversité. C'est enfin – point de vue de l'agronomie, de l'économie et de la géographie – une échelle pertinente pour l'évaluation de l'interaction entre l'homme et son environnement, à travers les paysages construits et modifiés par les pratiques humaines.

L'objectif est de mettre en relation les travaux de recherche sur ces thèmes et les techniques mathématiques et informatiques de modélisation statique et dynamique des paysages. L'accent sera mis notamment sur les questions de prise en compte des complexités spatiales – hétérogénéité, organisation -, des multiplicités d'échelles d'espace, de temps et de niveau de granularité, sur la diversité des types de modèles et les apports comparés des modèles stochastiques et déterministes.

La modélisation des paysages fait appel aux mathématiques et à l'informatique sur plusieurs plans :

- Tout d'abord pour disposer de méthodes permettant de caractériser les structures paysagères et la façon dont elles évoluent dans le temps. De telles méthodes relèvent de la théorie des probabilités, de la *géostatistique*, de la *géométrie stochastique*, de la *théorie des graphes* appliquée à l'analyse de réseaux. Mais elles peuvent aussi concerner des techniques de représentation qualitative mobilisant des concepts issus de *l'intelligence artificielle symbolique*.
- Ensuite pour disposer des *modèles dynamiques – discrets ou continus* - permettant de rendre compte du *fonctionnement* de ces structures complexes, analyser, comprendre et prévoir les réactions de ces fonctionnements aux perturbations pouvant avoir lieu. Les modèles à compartiments à base d'équations différentielles, les modèles d'équations aux dérivées partielles de dynamiques de populations structurées, les modèles discrets tels que les modèles de Leslie spatialisés, mais aussi les modèles individu - centrés sont des outils candidats pour la modélisation paysagère qu'il faut connaître et savoir intégrer.
- Enfin pour disposer des techniques permettant de formaliser les *déterminismes d'évolution des structures* elles mêmes ; Ces techniques relèvent par exemple de la *théorie des processus stochastiques* -notamment chaînes de Markov-, en temps discret voire continu, et utilisent des concepts issus de la physique statistique. Mais à des niveaux de granularités plus fins elles peuvent mobiliser des représentations explicites des acteurs des changements et de leurs processus de décisions, mises en œuvre au sein d'*approches à base d'agents*.

C'est précisément cette trame – représentation et caractérisation des structures paysagères, fonctionnement et dynamiques écologiques des paysages, dynamiques des structures paysagères, qui fournit après une introduction les trois volets de l'organisation de l'école. Ces trois volets associent des présentations de questions de recherche thématique, des présentations de concepts et d'outils, une mise en rapport avec les formalisations mathématiques et les algorithmes informatiques qui leur sont liés, des applications à des cas d'étude et des propositions d'exercices au cours de travaux dirigés. Les contributions des conférenciers sont découpées en sessions unitaires de formation d'1h30, cours magistral ou travaux dirigés ou encore exposé.

V- Contenu des cours et TD

La responsabilité scientifique du contenu de l'Ecole a été confiée initialement à Françoise Burel et Jacques Baudry, puis a été transmise à Philip Roche et Gérard Balent, pour être finalement assurée par Philip Roche et Sylvie Ladet. De ce fait, la définition du cahier des charges et la continuité de l'orientation scientifique ont été assurés par Jean-Pierre Treuil et Dominique Hervé.

Les cours de MIMOPA devaient balayer les thématiques suivantes :

Les analyses spatiales en mathématique et en informatique, les caractéristiques et indicateurs du paysage, l'initiation à l'écologie du paysage et à la modélisation de la dynamique du paysage. Une panoplie d'outils sont présentés à cette occasion : automates cellulaires, systèmes multi-agents, chaînes de Markov, modèles catégoriels, grammaire du paysage, topologie, graphes. La construction du paysage par l'homme et les représentations du paysage ont été peu abordées.

Les notes qui suivent ne sont qu'un point de repère pour une valorisation des exposés dans une publication, sur la base d'articles rédigés par les conférenciers à partir de leurs cours et

TD, avec un maximum de 350 pages pour un manuscrit préparé en LaTeX et proposable dans la collection Herman. Comme la thématique abordée est beaucoup plus appliquée que les sujets précédemment traités en mathématique dans cette collection, la pertinence de ce support éditorial sera vérifiée au préalable.

Philip ROCHE (actuel président de l'Association Française de l'Ecologie du Paysage)

15/09 - Les concepts de paysage, environnement, écologie du paysage et l'apport de la modélisation

L'écologie du paysage a percolé dans l'écologie ; elle reste peu présente dans le monde tropical, et est affichée par les anglo-saxons (UK, USA) plutôt que par les français.

La genèse historique du concept d'écologie du paysage et le rappel des théories fondatrices (patrons, échelle, diffusion, percolation, dynamique des populations, métapopulation, biogéographie, hiérarchie) introduisent comment l'espace est appréhendé en écologie et quels besoins apparaissent de quantifier le paysage. Quelle mathématisation de l'hétérogénéité, du transfert d'échelle ? L'auteur expose quels sont les apports de la physique statistique, de la mécanique des fluides, des modèles stochastiques ou mécanistes pour mathématiser l'hétérogénéité, les transferts d'échelle, les changements de grain entre représentations du paysage. Le logiciel Fragstat est présenté comme un outil permettant de calculer des indices de paysage à partir de données cartographiques (adjacence, connexité, fragmentation). L'auteur termine cette introduction générale par une question : quels modèles (« représentation abstraite d'un patron ou d'un processus ») en écologie du paysage ?

19/09 – Caractérisations spatiales multi-échelles des paysages et de leurs dynamiques

Philip Roche clôt la première semaine de l'école par des travaux dirigés (2 TD présentés sur les 4 prévus).

TD 1 : Comparaison de paysages réels et simulés avec des modèles neutres de paysages (aléatoires ou fractals), sous Fragstat et Arcview ; utilisation de QRULE, ouverture des fichiers images sous R. Le modèle neutre est une solution analytique car il ne s'appuie sur aucun référentiel biophysique ; il n'est pas fait pour générer un paysage réel, mais il sert de modèle de référence. Le modèle neutre de base est aléatoire (*random*). Lorsqu'il est de plus en plus complexe, il devient fractal.

TD 2 : Utilisation de Fragstats pour le calcul d'indices de paysage, importation fichier texte, calculs d'indices au niveau Paysage, Classes et Patch. On définit une métrique de mesure de la structure du paysage (indices, contagion, connectivité, diversité des patches):

- Au niveau paysage (*landscape*), une valeur pour toute l'image ou une fenêtre mouvante ;
- Au niveau classe, une métrique pour chaque code d'occupation du sol ;
- Au niveau patch, statistique au niveau de chaque patch.

On peut ensuite introduire des règles de voisinage, de type 4, 8, 12 cellules voisines, et définir des mesures de percolation et de lacunarité.

TD 3 : Effets des changements d'échelle sur la quantification du paysage ; évolution d'indices de paysage en fonction de données à des échelles différentes ; changement de grain/changement de l'étendue.

TD 4 : Utilisation d'un modèle Markovien simple.

Pascal MONESTIEZ

16/09 – Introduction aux méthodes géostatistiques

L'auteur introduit les principes de la géostatistique, les différentes méthodes d'interpolation (krigeage, co-krigeage), la recherche du meilleur estimateur, en utilisant le logiciel libre –R, gratuit sous Windows et Linux et le 4script-R. Il propose à la suite de son cours un TD mobilisant quelques fonctions de R sur des données écologiques et illustrant les questions de choix et d'estimation de modèles pour l'interpolation.

Les données spatiales sont le résultat de mesures faites en tout point de l'espace (support continu) et sur un nombre fini de sites échantillonnés : climat, température, précipitation, sols, animaux (l'unité de surface peut se déplacer). Dans ce contexte, il s'agit de caractériser la variabilité spatiale, d'interpoler entre les points mesurés, de simuler les variations spatiales et de calculer les erreurs d'interpolation. C'est l'objet de la **géostatistique**.

On s'intéressera aux points ou objets situés dans de petits domaines spatiaux ou transects connus exhaustivement (typiquement, des placettes de forêt), pour déterminer les caractéristiques dépendantes des positionnements relatifs, les propriétés d'indépendance, d'agrégation, pour repérer les régularités, et pouvoir finalement simuler des distributions spatiales. Les champs d'application sont vastes : population, épidémiologie, données parcellaires cadastrales, analyse d'images ; les outils divers : réseaux, lattices, champs de Markov.

Le point de départ s'oppose à la démarche d'un SIG : visualiser les données spatiales brutes sans hypothèse de régularité. Une application est présentée par l'auteur dans le domaine marin moins compliqué que le terrestre du fait des homogénéités et de la moindre incidence du problème d'échelle : la production primaire du plancton à travers la chlorophylle a. Observe-t-on des patterns, de la variable ? Dus à l'échantillonnage ?

Le modèle de base est un champ aléatoire $Z(s)$ où s appartient à D est un point du Domaine d'étude, 300 points constituant l'échantillon d'une seule réalisation. On peut tester une première hypothèse : (1) **la stationnarité** « la loi est invariante par translation », c'est-à-dire que la moyenne du champ est constante, il est suffisant d'avoir une stationnarité d'ordre 2 ; on affirme une seconde propriété : (2) **l'ergodicité** « on peut inférer les paramètres (moments) de la loi spatiale à partir d'une réalisation unique si le domaine d'étude est suffisamment grand ». En écologie, il existe des cas de réalisation unique. La covariance de deux variables décalées par translation λ ne dépend que de la translation λ ; les deux premiers moments de $Z(x)$ existent et sont invariants par translation.

De la covariance, on déduit un variogramme. D'une covariance gaussienne on déduit une distribution ordonnée ; d'une covariance plus complexe, des fonctions de Bessel ; dans un modèle anisotrope, le Voronoï sur Poisson inhomogène conduit à un générateur de mosaïque spatiale. La **variographie** est utilisée pour modéliser et pour estimer le modèle à partir d'échantillons.

Le **krigeage** est une méthode d'interpolation inventée par Jean Matheron (Ecole des Mines, Paris). A partir des graphiques de 3 modèles paramétriques ajustés, on s'aperçoit qu'un échantillon en paquets conduit à une instabilité numérique des matrices de variance. E ;

Bellier (2007) montre que le phénomène observé est la somme de sous-phénomènes indépendants agissant à différentes échelles. On peut appliquer un modèle hiérarchique bayésien multi-échelle non stationnaire pour prédire une variable aléatoire là où on ne la connaît pas. Le krigeage consiste à poser que la moyenne m est inconnue sous l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2. Prédire une carte est autre chose que prédire un pont mais on peut s'appuyer sur plusieurs points. Le variogramme sur les résidus revient à faire le krigeage sur les données. Le krigeage est piloté par les données, il ne marchera bien que dans une gamme de densité d'informations, les hypothèses jouant beaucoup sur les trous et les extrapolations.

Un autre exemple que le plancton, la détermination de la pollution azotée le long d'un réseau de 300 km de rivières, à partir de 80 prélèvements. On démontre dans ce cas que la covariance est spécifique de la distance au réseau hydrographique, donc de la métrique sur l'arbre, et non de la topographie sur l'arbre des branchements.

Solofoarisoa RAKOTONIAINA

16/09 – Techniques d'analyse d'image appliquées au paysage

L'auteur illustre une technique de décomposition des images satellites en ondulettes, utilisant des algorithmes à trous pour compresser les images. Si on dispose d'informations à priori sur la distribution des classes, on classe les images par le maximum de vraisemblance (MDV), sans tenir compte du voisinage de chaque pixel ; si on dispose en plus d'informations à priori sur les images, on procède par les champs aléatoires de Markov (MRF). On peut aussi utiliser conjointement les ondulettes et le MRF. Module d'IDRISI (IHS, PCA), Wavelet dans Matlab.

Joelson SOLOFONIAINA

17/09 – Concepts des systèmes dynamiques appliqués aux paysages (attracteurs, bifurcations)

L'exposé de l'auteur introduit la seconde semaine sur la dynamique des paysages : 1) attracteur, équilibre, cycle limite, tore, attracteur étrange, points singuliers, point limite ; 2) bifurcations ou mathématiques des changements de la structure qualitative ou topologique d'une famille donnée. Il présente des Solveurs sous Scilab. Il illustre ces notions par l'évolution des villes. Il est toujours possible de passer du continu au discret mais c'est plus délicat du discret au continu.

Pierre COUTERON (membre de l'AMAP, Montpellier)

17/09 – Description et modélisation de la structure spatiale d'un ensemble de points

L'auteur présente les processus ponctuels, un formalisme adapté à l'étude des semis de points (un point est un objet individuel sans dimension) en illustrant la structure spatiale d'une carte de points par des applications en écologie végétale : arbres, arbustes, peuplements végétaux.

$K(r) = 1$ type de points, structure du semis de points

$K_{12}(r) = 2$ types de points, processus ponctuels bivariés.

On peut placer des marques sur les points d'un semis de points. Si chaque arbre est un point, on peut par exemple attribuer les marques suivantes : espèce, mort, diamètre, hauteur.

Selon l'échelle, on aura des variables continues ou un semis de points dont les coordonnées (x, y) sont organisées en mailles géostatistiques.

En statistique, le processus stochastique est une catégorie de processus aléatoire dont les réalisations sont un semis de points et dont les propriétés vont définir la structure.

On étudiera donc la structure d'un semis de points réels et on simulera un semis de points de même structure, en définissant ainsi des hypothèses d'ergodicité et de stationarité.

Les processus ponctuels de poisson sont des processus aléatoires sans interactions ; ils ne conduisent à aucune structure spatiale. La structure spatiale peut être décrite le long d'un gradient allant de structures spatiales de plus en plus régulières (la répulsion entre les points fait que très peu de points sont proches) à des structures spatiales agrégées.

Ce sont les fonctions de Ripley ($K(r)$) et de Besag ($L(r)$) qui caractérisent la structure d'un semis de points :

$K(r)$ = E(nombre de voisins) divisé par la densité moyenne. Voisins à une distance r d'un point quelconque.

$K(r) = \int_0^r r^2$ surface d'un disque de rayon r , qui mesure l'absence de structure spatiale.

$L(r)$ = (racine carrée de $K(r)$ divisé par π) moins r . Si la loi $K(r)$ est de Poisson, $L(r) = 0$

L'apparition d'agrégats réguliers ou patterns permet d'inférer des processus par les structures.

Le maximum de la courbe agrégée donne le rayon des agrégats ; le minimum de la courbe régulière donne la distance inviolable autour de chaque individu, soit le rayon strict d'invulnérabilité.

L'intervalle de confiance entre les réalisations est $L(r)$ pour 100 semis de Poisson. Les points saillants positifs indiquent la taille moyenne ; les points saillants négatifs indiquent le seuil de séparation des points. La dérivée de la fonction $g(r) = dK(r)$ divisé par r donne la fonction de corrélation par paire : deux cercles à distance r l'un de l'autre, $g(r)$ mesurant la probabilité d'avoir un point dans chaque cercle distant de r .

Pour un processus simple, on a une idée claire de sa forme avec $L(r)$ et $K(r)$, mais des processus variés peuvent donner des structures similaires.

Dans le cas d'une densité locale en arbre /m², il y a des zones de densité croissante, de densité forte et de densité faible. François Goreaud approxime avec des triangles les corrections sur bord à limites complexes. Lorsque le peuplement est fait de gros arbres, c'est peu fréquent qu'ils soient proches. Il peut y avoir une certaine complémentarité entre deux espèces. Ces équations alimentent la réflexion qualitative en écologie.

- Soit H_{01} , le test d'indépendance pour la comparaison entre deux cartes.

Sous H_{01} , $K_{ij}(r)$ reste inchangé si on décale l'ensemble des points selon un vecteur aléatoire. La nouvelle carte est superposée à la carte fixe après décalage aléatoire, à condition de partir de cartes suffisamment homogènes. Il n'y a pas de test global d'indépendance, on interprète la forme de la courbe et l'intervalle de confiance.

- Soit H_{02} , le test d'étiquetage aléatoire.

Sous H_{02} , on réaffecte les modalités de la marque, $K_{ij}(r)$ restant inchangé.

2 types de marques : étiquetage aléatoire et marques associées agrégées.

Ségrégation spatiale ou agrégation des deux modalités. [ADS dans R, cf. Pélissier & Goreaud]

Application aux dégâts sur la forêt à la suite d'une tempête, en généralisant les processus d'éclaircie et de mortalité d'arbres. Le processus ponctuel a été modélisé à partir d'un PCP, processus agrégatif de Poisson :

PCP1 = parents

PCP2 = nombre aléatoire de descendants indépendant pour chaque parent.

Dans un premier modèle, tous les points sont les mêmes. Dans un second modèle, on a deux types de points (par exemple, malade/bien portant). Une marque sur chaque point distingue les deux espèces. On fait l'hypothèse de l'indépendance : pas de relation spatiale entre les deux processus. Un même processus ponctuel reçoit des marques aléatoires (*random labelling*).

Soit un semis bivarié $k_{ij}(r) = F(\text{nb de points } j) / \text{densité moyenne de } j$

J est à la distance r de i et réciproquement.

Selon l'hypothèse nulle $H01$, $K_{ij}(r) = \pi_i r^2$

Selon l'hypothèse $H02$ (étiquetage aléatoire) ; $K_{ij}(r) = K_{mm}(r)$ avec m appartient à $M1$ union $M2$, i appartient à $M1$ et j appartient à $M2$.

On peut distinguer différentes structures du mélange : répulsion, attraction, indépendance.

Application à la dynamique de l'occupation du sol sur le corridor forestier de Fianarantsoa (deux exposés, de Rakotoasimbahoaka et Ratiarson)

Cyprien RAKOTOASIMBAHOAKA

18/09 – Modélisation des dynamiques de l'occupation du sol en forêt : aménagement, défriche, population.

L'auteur modélise les dynamiques d'occupation du sol péri-forestière avec des automates cellulaires et des lois logistiques sur un pas de temps annuel à partir de données sur l'aménagement des bas-fonds en rizières et la défriche des pentes, sous plusieurs scénarios de croissance démographique. Il se donne ainsi les moyens de prédire la date de saturation des bas-fonds dans chaque commune du corridor forestier de Fianarantsoa.

Venot RATIARSON

18/09 – Dynamiques de changement d'état et formation des paysages (approches markovienne et multi-agents)

L'auteur se place à l'échelle du territoire villageois et traite des changements d'états parcellaires post-forestiers par des approches markoviennes, modèles à base de règles et finalement système multi-agent, en explorant les questions suivantes : possibilités et conditions d'une régénération forestière, conditions d'une bifurcation à une couverture herbacée au cours de la jachère, existence d'une situation stationnaire de mosaïque forêt – agriculture.

Florence LE BER

18/09 – Représentation qualitative de l'espace et raisonnement : apports de l'intelligence artificielle symbolique

L'intelligence artificielle est mobilisée par l'auteur pour concevoir des systèmes intelligents en construisant, pour calquer le raisonnement, une chaîne d'inférences pour arriver à un but.

- 1) Modéliser des connaissances spatiales
- 2) Représenter et raisonner
- 3) Classifier des paysages en 2D
- 4) Représenter informatiquement des organisations spatiales agricoles.

On part de connaissances du « sens commun ». On ne s'appuie pas sur des mesures mais sur des informations qualitatives et incomplètes, des modèles qualitatifs du temps, en ayant

recours aux domaines de la psychologie, la logique, la linguistique, l'informatique. Les modèles spatiaux en 2D s'appuient sur le temps car il est plus simple de travailler sur une seule dimension que sur deux à la fois.

Relations temporelles qualitatives

Algèbre de points (Vilash et Kantz, 1986-1990), qui repose sur 8 relations : $\leq$, $\geq$, $\neq$, $\emptyset$, $?$, $x < y$, $x > y$, $x = y$

Algèbre d'intervalles (Allen, 1981-1983), qui repose sur les degrés de recouvrement des intervalles avec 6 relations : E^2 , E , $\emptyset$, et , ou , $appartient \grave{a}$, conduisant à 13 relations exhaustives et disjointes deux à deux soit $2^{13} = 8192$ éléments.

Représentation d'évènements par analyse des discours, en distinguant les relations plus ou moins sûres, en appliquant les règles de transitivité et de composition entre les assertions de manière à retrouver quel a été le raisonnement temporel permettant d'expliquer une succession d'évènements. On détecte l'incompatibilité de certaines règles, on élimine certaines relations dans un ensemble de possibilités.

Raisonnement spatial

Il existe différents espaces et différentes entités spatiales. Le raisonnement spatial se définit comme les relations qualitatives entre des objets appréhendés par leur distance, leur orientation, leur topologie, en utilisant pour cette description le moins d'éléments possibles.

1) Orientation

Géométrie élémentaire sur les points = alignement, relations entre, sur les angles = congruence, sur les lignes = parallélisme ou orthogonalité

Géométrie vectorielle = définit un ordre sur l'espace, avec des axes de référence, des quartiers de l'espace

Orientation dans un espace local diffère de l'orientation dans un espace global (géoréférencement).

2) Distance

Distance mathématique euclidienne

Distance qualitative est relative (congruence entre segments), discrète (proche, moyen, loin) ; elle pose des problèmes d'additivité : on ne peut déduire la distance entre a et c de proximités entre a et b et entre b et c.

3) Topologie

- Topologie mathématique, topologie entre régions quelconques, topologie entre rectangles (les objets se touchent ou se recouvrent, selon Allen étendu à 2 dimensions).

(E, T) où T = ensemble de sous-ensembles de E exhaustifs et disjoints, 0 et E sont ouverts.

Une région fait partie d'une autre région mais on ne parle pas de frontière des objets.

- Méreotopologie à partir de C

On utilise des notions ensemblistes pour décrire des organisations spatiales. Pas de partie commune, ni de recouvrement entre deux ensembles. Le point et la frontière sont alors introduits en plus des régions pour décrire des paysages.

- Algèbre RCC8 (P(RCC-8), $\vee$, $\wedge$, 0, RCC-8) : 5 relations parmi les 8 catégories.
- Raisonnement spatial avec une table de composition en x, y, z :

- (1) Vérifier la consistance d'un ensemble d'assertions, (2) Trouver une interprétation qualitative, (3) Inférer de nouvelles relations.

- Voisinage conceptuel des relations, par des opérations ensemblistes

Hiérarchie ou ordre des relations entre deux objets

Mangelinck (1998) a défini la notion de frontière virtuelle, les intersections des frontières, les intersections des intérieurs ; il a identifié les correspondances entre les opérations ensemblistes et les relations topologiques.

Applications

Application 1, dans le cas du raster augmenté : aux pixels 2D sont ajoutés des segments et des points. L'intervention des frontières ne fait appel qu'aux segments et aux points.

Calcul de la relation « entre », qui est une relation floue et contextuelle (I. Bloch, atelier RTE, 2007).

Application 2, à la recherche de structures villageoises sur des images satellitaires, relations entre des modèles agronomiques et des images satellitaires. Calcul d'indices à partir de cartes d'occupation du sol, réactualisation d'une image passée, suivi de l'évolution des villages (un village est défini par ses limites, par son finage), test de comparaison d'images, description qualitative du paysage par des dires d'expert sur le finage.

Classification d'instances : hiérarchie, instance i définit un ensemble de priorités, concept C est le concept le plus spécifique auquel l'associer.

Application 3, à la représentation des connaissances dans le diagnostic médical :

Objets/agents, graphes, mécanismes de raisonnement, classification, déduction.

Système expert -> système à base de connaissances -> ontologie, web sémantique.

Application 4, à l'organisation spatiale des exploitations agricoles (Sylvie Lardon).

Codage pour arriver à des chorèmes, mais il y a beaucoup de subjectivité car pas de symbolique partagée. Pour l'occupation du sol et les processus spatiaux, il faut informatiser la base et retrouver des structures pour les comparer, représenter des organisations spatiales et mettre à jour des liens.

Représentation par des graphes et opérations sur les graphes

Réseaux sémantiques, graphes conceptuels (1930) = nœuds et arcs étiquetés (couples de nœuds avec un début et une fin). Concepts hiérarchisés, relations reliant un certain nombre et types de concepts : relation d'ordre partiel < relation de spécialisation (généralisation ou subsomption).

- Spécialisation, selon un nombre fini d'opérations élémentaires :

On simplifie en supprimant des sommets (relations jumeaux)

On restreint les concepts (diminution des étiquettes)

Joint interne = fusion de deux sommets concepts

Somme disjointe de deux graphes

- Généralisation :

Duplication par ajout d'un sommet relation jumeau

Changement de concept

Augmentation de relations

Eclatement lorsqu'un sommet donne deux sommets concepts

Distance d'édition entre deux graphes H et G

Somme des opérations élémentaires qui permettent de transformer H en G ou G en H .

- Projection :

$H \rightarrow G$ = couple d'applications qui associent un sommet-relation à un concept H, et un sommet-relation à un concept G. Donc la projection est une suite d'opérations de spécialisation en conservant les arêtes et la numérotation des arêtes en restreignant les étiquettes des sommets.

Application à un graphe d'organisation spatiale : une fois formalisé avec des propriétés, il peut être manipulé. Les chorèmes, ce sont 15 concepts et beaucoup de relations.

Ontologies

Ontologie formelle = base de connaissances = base du domaine

Ensemble structuré de concepts et de relations dans un domaine donné

Arborescence ; on peut boucler l'arborescence pour arriver à un treillis.

Applications aux termes utilisés par les agronomes.

Raisonner = comparer des organisations spatiales, interpréter, mettre à jour des liens.

Raisonner à partir de cas = utiliser l'expérience acquise pour résoudre de nouveaux problèmes ; inspiré des sciences cognitives ; problème – solution – méthode.

Ex : recette de la tarte aux pommes, jurisprudence (retrouver le cas concerné)

	Remémoration
Source	<- Cible
Sol (source)	-> Sol (cible)
	Adaptation

Comparaison des exploitations agricoles (typologies)

A partir d'une exploitation connue, classer une nouvelle exploitation.

A partir de l'espace, inférer le fonctionnement d'une exploitation, c'est plus difficile.

On apprend dans chaque cas et on enrichit la base de cas.

Eléments de conception :

- Définir des cas (problème, solution)
- Structurer des cas (index, hiérarchie)
- Définir une mesure de similarité entre problèmes
- Relier remémoration et adaptation
- Chemin de similarité : aux opérations qui transforment les problèmes correspondent des opérations sur les solutions.

Méthodes statistiques = beaucoup de quantitatif, base de cas peu structurée.

Méthodes symboliques = peu de cas, qualitatif, structure complexe.

On rencontre des problèmes assez généraux dans l'organisation spatiale de l'exploitation agricole : mesures agri-environnementales (bande enherbée, replantation bois...), réseau de routes...

Adaptation = les opérations liées aux problèmes sont transférées aux solutions.

Qu'a-t-on le droit de faire en manipulant des graphes ? Une autre voie est celle de la simulation à base de règles, à base d'agents, à base de formes paysagères.

Mohammed KHALADI

22-25/09 – Dynamiques des populations dans les paysages, méthodes pour l'étude des modèles en temps discret, modèles de dynamique de populations structurées

Dynamique de population de lapins

Définir le sexe ratio, le taux de fécondation, le nombre de femelles pour écrire l'équation de renouvellement de l'espèce. Cette équation donne les valeurs propres de la matrice de Leslie = écriture matricielle de la suite géométrique.

On structure la population en classes d'âge afin de prévoir l'évolution globale de la population (tendance de la population), qui sera donnée par la plus grande valeur propre de l'équation de renouvellement.

En temps discret, si la valeur propre est 1, la population est stable.

Si la valeur propre est inférieure à 1, la population va s'éteindre.

Si la valeur propre est supérieure à 1, la population augmente.

Le vecteur propre, multiplié par la matrice, garde la même direction. La population peut augmenter ou diminuer mais dans la même proportion ; la pyramide des âges reste stable.

Plante annuelle avec banque de graines

On reconstitue le cycle de vie avec des graines qui émergent de la banque de graines, qui poussent, qui donnent des plantes qui produisent des graines puis qui meurent. Une partie des graines dans le sol germe au printemps. Une partie des graines ne germera qu'au printemps suivant. Chaque année, une partie des graines est perdue (mortalité, prédation, entraînement par le ruissellement, etc.).

Définition d'un pas de temps annuel.

Choix du moment du recensement.

Choix des variables démographiques.

Détermination des paramètres démographiques.

Population des graines, $G_i(n)$ = graines ayant passé i années dans le sol l'année N .

G_0 = graines tombées au sol

G_1 = graines ayant passé un an dans le sol

G_N = graines ayant passé N ans dans le sol

Marquage des graines : une couleur par année

Le mécanisme non connu est la durée pendant laquelle les graines attendent la germination : la levée de dormance des graines peut être obtenue par immersion dans l'eau, scarification, acide. Ensuite, la germination dépend des circonstances climatiques et du lit de semence.

Paramètres : taux de germination (% des graines qui germent chaque année), taux de survie des graines à chaque période (durant la période de germination, entre la période de germination et la période de croissance, etc.).

L'écriture de l'équation de renouvellement, avant de se lancer dans le calcul, sert à s'assurer de l'existence de la solution que l'on cherche et de son unicité. Avec le modèle, on peut revenir au terrain avec des questions, une liste des données indispensables, un protocole consolidé.

Théorème de Perron Frobenius

Si M est une matrice positive (termes positifs ou nuls), irréductible et primitive (non cyclique), la valeur propre simple est supérieure à 0 et strictement dominante.

On a simplifié la matrice de Leslie en un graphe à deux stades et une matrice 2×2 = matrice de projection.

Les notions suivantes sont introduites : matrices, graphes, modèles linéaires, non linéaires, logistiques, stochastiques ; capacité du milieu, compétition entre espèces ; espace = localité + déplacement de populations entre deux espaces ; dispersion = stratégie stable dans l'évolution assurant la pérennité de l'espèce.

Modèle linéaire

Avec un modèle linéaire stable, on se limite au cas où la survie des plantules est faible et la fécondité est elle-même faible du fait de la compétition intra-spécifique. La limitation par la ressource fait qu'aucune population ne peut devenir infinie. Le comportement représenté reste « pauvre » ; le seul point d'équilibre intéressant étant justement instable. D'où le passage au non linéaire, plus « riche » mathématiquement.

$X_{n+1} = \lambda X_n$; λ constant ou fonction du nombre des individus.

$X' = r X$

$r = \alpha (1 - X/K)$

Quand $t \rightarrow \infty$, $X(t) \rightarrow K$; la mortalité est stabilisée sur K , la croissance est limitée par K .

La loi logistique est introduite en temps continu ou discret. On observe les points stationnaires et les changements de comportement indiquant le passage d'un comportement logistique à un comportement chaotique.

L'auteur définit la fonction de densité, le diagramme de bifurcation, la compétition entre espèces, le changement de variables.

Introduction de l'espace dans les modèles de dynamique de population

L'espace peut être introduit par le déplacement de populations entre des espaces différents.

On peut assister à un changement de statut (exemple de jeune à adulte) au cours de la migration. On commence par deux sites, avec des jeunes et des adultes dans chaque site, avec le processus de reproduction, qui inclut des distances ou des déplacements.

On généralise à une population subdivisée en N classes d'âge vivant sur m sites.

Etude des matrices par Jean-Dominique Lebreton (CEFE-CNRS).

Sylvie LADET

22-23/09 – Fragmentations des habitats et leurs conséquences biologiques dans le cas des compétitions agricultures-forêts ; interactions entre processus écologiques et dynamiques socio-économiques.

TD N° 1 : V3-B1 (Idrisi 32 et Fragstat 3.3).

Classification supervisée d'image satellitale : le logiciel recherche tous les pixels qui se ressemblent, à partir des parcelles repérées au GPS de la zone d'entraînement puis validation sur des zones test, des zones d'intérêt plus petites.

Classification non supervisée : orientée par l'utilisateur.

Image raster dans Idrisi, 3 bandes : 2, 3, 4, module cluster dans Analysis, Image processing.

Forêt / non forêt, nombre de taches et surface totale de la tache dans l'image entière sous Fragstat. On peut analyser sous Fragstat soit l'image déjà classée, soit l'image brute.

Idrisi -> Ascii -> Arc Raster

VIDEO de Françoise Burel, Eric Garnier sur le thème: Agriculture et diversités.

Richesse en espèces, diversité fonctionnelle (5 espèces d'arbres et 5 espèces herbacées),

2 échelles spatiales : parcelle (système de culture, prairie) et paysage (effet de l'hétérogénéité et connectivité sur la biodiversité).

Effet de l'abandon ou, au contraire, de l'intensification des pratiques :

Paysages simples x intensification des pratiques (labour, fertilisation et coupes prairies)

Paysages complexes x intensification des pratiques.

Réversibilité du processus d'appauvrissement si le pool d'espèces n'est pas trop diminué : seuil critique = 30% pour le maintien de la biodiversité.

TD N° 2 : V3-B2. Analyse spatiale de l'image de végétation de Madagascar (Kew Botanical Garden) sous le logiciel Arcview 3, à partir des données d'entrée « vegetation.grd » Metadata. Application des fonctionnalités de base.

Présentation de l'unité de recherche DYNAFOR (INRA)

Dynamiques forestières dans l'espace rural, liens avec ENSAT Toulouse, 40 personnes dont 3 HDR Ecologie (écologie du paysage, écologie forestière, entomologie, écophysiologie), 2 HDR Gestion des ressources, élevage et territoire.

LTER 1981 : vallées et coteaux de Gascogne, pour des activités agricoles et forestières.

Zone périphérique du Parc national Pyrénées (2002) : pastoralisme, accrus, biodiversité, frênes envahissant les prairies (espèce forestière classée à bois précieux).

- En écologie du paysage : fragmentation, hétérogénéité spatiale et temporelle, habitats et biodiversité, origine et dynamique des patrons spatiaux dans les paysages, mosaïque et connectivité dans les paysages agricoles.
- Interface Agriculture – Forêt. Applications aux objets : ilots boisés, lambeaux forestiers, haies, arbres isolés / « accrus » forestiers, dans un contexte de déprise favorisant la recolonisation des espaces herbacés par la forêt, lisières / mosaïques polyculture – élevage, friches, forêts.

Questions :

- Dynamique des activités agricoles et forestières, scénarios d'évolution
- Multifonctionnalité et diversité des habitats
- Structure et dynamique des habitats écologiques.

Outils : BD relationnelle (ACCESS), base de données spatiales, Landsat, SPOT, MNT, photographies aériennes depuis 1940.

Chantiers au Sud :

Invasion par les acacias à La Réunion (Balent, 2002),

Plantes invasives en Nouvelle Calédonie,

ANR forêt rurale Cameroun avec Guillaume Lesculier, Pondichery Inde avec Claude Garcia.

ANR Popula : politiques publiques et forêt rurale au Maroc s'achève fin 2009.

Transformations dans les systèmes d'élevage (Amérique du Sud, Amazonie, Asie) et SMA pour des scénarios s'achève fin 2008.

Fragmentation

- 1) Perte d'habitats (réduction de la superficie totale de l'habitat ou fragmentation de zones continues conduisant à des fragments distincts).
- 2) Risque d'extinction : 19% de l'extinction des mammifères et 36% de l'extinction des oiseaux sont expliqués par la perte d'habitats.

Les risques 1 et 2 augmentent lorsque la population humaine augmente.

La fragmentation se traduit sur les images 1750 / 1860 / 1942 / 1998 par :

- 1) Trouées dans la matrice de forêt
- 2) Augmentation des trouées en forêt
- 3) Modification de l'habitat par rapport à l'habitat de départ
- 4) Fragments boisés dans une matrice agricole.

Biogéographie des îles : la richesse en espèces se mesure en fonction de la taille des îles et, parallèlement, une métrique du paysage permettant de quantifier la fragmentation.

Développement durable

Millenium Assesment : changements de comportements pour atteindre certains objectifs. Effet de l'augmentation de la température sur la diminution de la période de végétation. Impact plus

important sur les pays en développement dont 15% du revenu provient de l'activité primaire, agriculture ou pêche.

Services écologiques : approvisionnement, régulation, écotourisme – paysage, support : biomasse, sol, oxygène, régulation des crues, qualité de l'eau.

Mountains, forest woodlands, mangroves et zones humides / carbon, seed dispersal, food production

SES : Drivers -> Pressure -> State (compartiments) -> Impact (biodiversité, invasions, extinctions) -> Response (gestion)

Secteurs concernés : démographie, villes – transport, santé, occupation du sol

« résilience » = côté face de la « vulnérabilité » = capacité d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser en conservant ses fonctions, sa structure, son identité, ses rétro-contrôles.

Groupe systèmes complexes : résilience + alliance = ecology and society. www.resilience.org

Première conférence de Stockholm, Centre International de la Résilience, 09 /07.

Modélisation = représentation simplifiée de la réalité ou partisane de la réalité. Passage du SIG au SMA (compétences CORMAS à l'ENSAT, biométrie à l'Inra Toulouse).

Chaînes de Markov spatialisées : état n-1, cellule voisine automate cellulaire, analyse multicritère. IDRISI 32, module CA Markov. Changements de l'utilisation des terres et dynamique des paysages de montagne soumis au boisement spontané [5 états : crop, meadow, intensive pasture, extensive pasture, wood ; pixel minimum = 200 m² , pas de temps minimum = 10 jours].

Fabien CAMPILLO

24/09 - Introduction aux modèles markoviens

Markov (1856 -1922)

Tous les modèles sont faux mais certains sont utiles : modéliser avec un but.

Equilibre entre complexité et faisabilité : on veut toujours rajouter des données ; retour aux données avec le modèle. On cherche la simplicité, en respectant un principe de parcimonie.

Le traitement de l'*aléa* (en latin = jeu de dés) permet de simplifier certaines complexités (tirage aléatoire pile ou face, par exemple), tirages pseudo-aléatoires avec la méthode de Monte Carlo. L'aléa est souvent perçu comme une couche conceptuelle supplémentaire par rapport aux modèles déterministes. L'aléa est à distinguer du *hasard* (mot arabe (az-zahr), azar en espagnol). Stochastique, conjectural en anglais, vient du grec stokhastikos.

Historique

1906 Markov étend la loi des grands nombres et le théorème central limite.

1913 Il applique ses chaînes à l'analyse d'un roman

1948 Théorie de l'information de Shannon

1949 Monte-Carlo – Metropolis

1950 Dynamique des paysages (Feller)

1965 Evaluation des performances des ordinateurs (Allan & Scherr)

1970 Markov cachés HMM

1987 Dynamique des paysages Turner

1989 Baker

1990 Application des HMM en bioinformatique

2002 Urban, Wallin

2004 Tucker, Amand

Markov

Usher, 1992 : modèles de succession

Suivis de 50 quadrats pendant 3 ans, 2 successions par quadrat, dans 3 sites indépendants $E = \{A, B, C\}$.

Décompte des transitions $A \rightarrow A$, $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$, successions issues de A, successions issues de B, successions issues de C.

50 transitions $i \rightarrow j \rightarrow k$ et 100 transitions $i \rightarrow j$. Niveau 0, non spatial.

Matrice de transition de Markov : valeurs toutes positives, somme des valeurs = 1.

On observe un comportement asymptotique : à chaque itération les chiffres changent mais les proportions ne changent pas ; l'invariance converge vers un état stationnaire.

On peut passer des chaînes de Markov aux graphes. Les temps de séjour dans chaque état ont des lois précises dans Markov. Ils permettent de détecter si un jeu de données suit ou non un processus markovien. Si les temps de séjour sont différents, on passe à un modèle semi-markovien. Les matrices doivent être homogènes dans le temps et dans l'espace. L'espace d'états est fini et le nombre d'états est réduit.

Markov d'ordre 0 : le futur ne dépend que du présent.

Markov d'ordre 1 : $n+1$ dépend de n et de $n-1$

Markov d'ordre 2 : $n+1$ dépend de n , $n-1$ et $n-2$.

On peut utiliser un test d'indépendance pour détecter si le processus est indépendant.

En temps discret ou continu, loi de probabilité conditionnelle de Y sachant X.

Processus à valeurs dans E. Loi de $(X_0 : n)$ on prend en compte tout le passé, on oublie tout le passé, ou oublie quel passé ?

Markov d'ordre 0 : Loi $(X_n / X_{n-1}) = \text{Loi}(X_n)$, pas de dynamique

Probabilités de transition suivent un Markov d'ordre 1 = loi (X_n / X_{n-1})

Markov d'ordre 2 : on garde les deux états précédents, mais on fait l'hypothèse de l'homogénéité de la matrice de transition.

La loi d'une chaîne de Markov homogène est entièrement caractérisée par sa matrice de transition Q ($N \times N-1$) et sa loi initiale V ($N-1$) ; elle réduit un processus compliqué en un vecteur et une matrice. La matrice de transition suit une loi conditionnelle.

On distingue et on voit sur le graphe un état absorbant, 1 classe transiente, 2 classes récurrentes, 3 classes récurrentes.

Pour avoir une seule solution, il faut 0 état absorbant, pas d'état transiente, et que tous les états communiquent entre eux ; on obtient alors une seule classe récurrente.

Propriétés du modèle markovien :

- Transition, colonisation, perturbation, remplacement d'une espèce, transition au niveau d'une espèce ;
- Temps de récurrence, le temps de séjour d'un modèle markovien suit une loi géométrique de paramètre p ;
- Vitesse de convergence à l'équilibre ;
- Durée au bout de laquelle on peut arriver à l'état stationnaire.

Markov caché (HMM)

Les modèles de Markov cachés ont été surtout développés en linguistique et en bioinformatique.

$X_0 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4$

$Y_0 \quad Y_1 \quad Y_2 \quad Y_3 \quad Y_4$

La loi $(X_0, \dots, X_n, Y_0, \dots, Y_n) = \text{loi}(X_0) \text{loi}(Y_0/X_0) \text{Somme } i=1 \text{ à } n, \text{loi}(X_i/X_{i-1})$

Discussion : Markov caché, semi-Markov, Markov spatialisé.

Modèle individu-centré

1 arbre dans une forêt : naissance, croissance, compétition, mortalité naturelle ou par compétition, évolution continue dans l'espace et dans le temps.

Chaque individu a autour de lui une aire d'influence, une aire de projection (canopée) ; il se définit par une position et le rayon de sa zone d'influence. On définit un taux de naissance avec des règles (comme : pas de descendant au dessous d'une certaine taille), un taux de mortalité (mortalité naturelle ou par compétition), ce qui conduit à définir un taux maximal d'évènements permettant la gestion du temps, sachant que chaque individu a 3 horloges (naissance, mort par compétition, mort naturelle). On calcule par des probabilités l'occurrence de l'évènement suivant.

Rivo RAKOTOZAFY

24/09 - Dynamiques des structures paysagères par des approches markoviennes

L'auteur prolonge le cours de Fabien Campillo.

En analyse mathématique, on se trouve vite limité par le nombre de variables. On peut traiter par exemple la persistance de deux populations. Le modèle machine constitue un outil expérimental supplémentaire.

Le modèle de moment est un modèle sur le noyau et sur la corrélation, à partir de processus ponctuels de Poisson, purs, discontinus, etc.

Le mouvement brownien est continu, non dérivable car lié à la diffusion ; il peut être traité par un calcul différentiel stochastique.

Le mouvement Laplacien s'applique au mouvement de particules en interaction ; il peut déboucher sur l'EDP par la densité de répartition des particules. En discrétisant l'EDP, on parvient à discrétiser l'espace et on débouche sur les chaînes de Markov. Il y a donc des ponts entre tous ces outils.

L'auteur propose en TD une simulation sous SCILAB de chaînes de Markov sur les données de changement d'états du programme MEM que traite également Venot RATIARSON dans sa thèse. La chaîne de Markov est totalement déterminée par la loi initiale, discrète, et la matrice de transition. L'auteur introduit les notions d'inférence statistique sur les coefficients de la matrice de transition, la fonction de vraisemblance, l'estimateur du maximum de vraisemblance (EMV). Il rappelle une propriété du temps de séjour dans un état, propre au modèle markovien : le temps de séjour suit une loi géométrique de paramètre p .

Il développe les estimateurs bayésiens : loi à priori de Jeffreys, loi à postériori, MCMC de Monte Carlo, en comparant le comportement de différents estimateurs et leur coût en temps de calcul. Il discute ainsi des outils à mobiliser : modèle Markov pur, semi-Markov, Markov caché, Markov spatial.

Cedric GAUCHEREL

25/09 – Modèles de paysage catégoriel, modèles à processus explicites, modèles neutres ; approches issues de la physique statistique

L'auteur compare un modèle neutre de paysage centré sur des mécanismes d'auto-organisation, et un modèle explicite centré sur des mécanismes markoviens (« neutre » = hasard = aléatoire). Il présente un prototype DYPAL pour manipuler des paysages catégoriels

par des grammaires formelles. Il s'agit de modéliser un paysage, c'est-à-dire un agencement dans l'espace des cultures en incluant d'autres éléments, formes et limites des parcelles, voisinages (par exemple, parcelle en amont/parcelle en aval).

Paysage « anthropique » = aménagé, paysage « dynamique », multi-échelles

- 1) Modélisation du paysage
- 2) Auto-organisation et modèles neutres
- 3) Langage du paysage et modèles explicites
- 4) TD sur les paysages catégoriels.

Modélisation du paysage

Paysage = peinture, subjective, perception, perspective. Tableau = représentation simplifiée de la réalité. Il peut y avoir deux représentations du même paysage ou deux tableaux du même objet.

Cadastre Romain, Cadastre Napoléonien 1830, codifier la structure du paysage 1913.

Photos aériennes 1987, 1998, évolution des mangroves dans des zones vraiment inaccessibles.

Simulations numériques et visualisations 3D.

Paysage = ensemble exhaustif des éléments de nature diverse qui interagissent et évoluent à plusieurs échelles spatiales et temporelles simultanément. Paysage = objet $\neq$ échelle.

Parcelle [1 an], boisement [10 ans], réseau routier [?]

Modèles de structures : points, patterns (OD), network (connected graphs) (1D), continuous surface (2D), categorical maps (2D+).

L'effet de l'hétérogénéité sur la connectivité et la fragmentation est abordé mais très peu la composition, configuration, taille, forme des parcelles. La géométrie et la topologie sont très peu modélisées. Par contre le voisinage est pris en compte (proximité des arbres, dissémination des graines).

Structures, patterns : quels sont les facteurs à l'origine de cette structure ? Quelle influence ont ces structures sur les mouvements d'organismes et les flux de matière et d'énergie ? Pour Forman et Godron, la structure conditionne le paysage. Pourquoi modéliser le paysage ? Modéliser le paysage par lui-même pour comprendre son fonctionnement ou pour accompagner des simulations ?

1) Modèles neutres de paysages (MN)

Estimer la distance entre un paysage étudié et un paysage neutre

Forme des parcelles approchée avec des triangles et des trapèzes.

Auto-organisation des paysages catégoriels = hypothèse nulle

Dans la théorie du contrôle, théorie du contrôle optimal : minimum et maximum des fonctions intégrales, principe de Fermat et moindre action, minimiser une série d'équations différentielles (principe de Pontryagin, 1908, 1988).

Résolution indirecte par les dérivées d'un Hamiltonien (recherches des frontières dans l'espace des paramètres) contrairement aux méthodes directes d'approximation polynomiale de premier ordre, qui aboutissent à des résolutions numériques.

2) Paysage géomorphologique / réseau hydrographique

Métrique = débit en tout point du paysage -> surface collectrice...quantifier en tout point un réseau hydrographique. Le chemin du ruissellement est préférentiel et optimisé.

La somme des débits à l'exutoire de tous les bassins versants est un Hamiltonien. Qi est assimilé à la surface collectrice. On n'a pas le débit en chaque point du réseau, ni la surface de chaque bassin versant. Les réseaux sont auto-similaires sur tous les réseaux hydrographiques

de la planète. Le réseau est caractérisé par sa pente. Le BV est la meilleure structure pour collecter l'eau. Optimalité globale et optimalité locale.

Relation entre la dépense d'énergie locale et la structure topologique locale.

- Dépense d'énergie globale par unité de surface collectrice
- Dépense d'énergie minimale au sein de chaque bras
- Dépense d'énergie minimale dans l'ensemble du réseau

Réseaux simulés : γ variable au sein du réseau dans des sous portions du réseau. Ce principe permet de modéliser des gammes différentes de réseaux hydrographiques.

$\gamma = -1$, réseau sinueux (non réaliste)

$\gamma = 0.5$, réseau naturel

$\gamma = 1$, réseau orienté (flancs de collines, failles)

On vérifie qu'on a beaucoup d'autres propriétés auto-similaires : rapports de longueurs, taux de bifurcations. L'auto-similarité est vérifiée jusqu'à 5 ordres de grandeur.

3) Paysages catégoriels

Algorithme

1 parcelle A bornée

Semis aléatoire

Calcul de l'énergie du semis E_0

Déplacement aléatoire d'un point....comment est-il paramétré ?

Calcul de l'énergie du semis E

$E < E_0$

Soit conservation de l'ancienne configuration, tant que $E < E_0$,

Soit configuration nouvelle, avec le même potentiel $E = E_0$.

Les germes sont positionnés par Gibbs dans les parcelles, puis on ajuste par télédétection les parcelles aux germes.

Paysages catégoriels auto-organisés :

- Auto-organisation sur de larges gammes d'échelles lorsque leurs unités sont en interaction (colonisation, rotation agricole),
- Paysages optimisés globalement par un mécanisme de minimisation des interactions.

Pour une probabilité i d'occurrence de l'occupation du sol, $S = - \sum_i p_i \log p_i$

Tous les paysages n'ont pas d'autosimilarité.

Exemple de couvert forestier

On a une densité d'arbres locale. On calcule toutes les densités deux à deux entre deux parcelles. On construit le potentiel à partir des différences de densités d'arbres entre chaque paire d'unités forestières ou d'unités de paysage : constitution des paires de parcelles, calcul du potentiel de toutes les paires, sommer et minimiser.

La composition reste la même mais on caractérise en plus la structure avec des différences de densités entre paires de parcelles. γ connecte les processus locaux avec la structure topologique globale du paysage. En minimisant l'Hamiltonien, on aboutit au Gibbs. L'algorithme de Gibbs, inspiré de la physique statistique, est adapté au paysage.

Potentiel simpliste :

- 2 unités non voisines ont un potentiel nul.
- 2 unités voisines ont des attributs différents, le potentiel est nul.
- 2 unités voisines ont les mêmes attributs, le potentiel est égal à 1.

La grande majorité des modèles neutres de paysage manipulent les attributs mais pas leur géométrie. Gibbs offre une marge de manœuvre, par marquage, pour simuler des paysages optimisés. Un certain nombre de paysages peuvent s'auto-organiser mais pas tous.

Les capteurs satellites ne distinguent pas les formes mais simplement les usages ; le très grand nombre de pixels permet de restituer les formes. Le paysage final dépend du paysage initial et des règles d'évolution.

Grammaire du paysage

Apparition / Disparition, Dilatation / Erosion, Union / Division.

A partir d'une grammaire formelle, on peut définir une syntaxe, des mots d'un alphabet, en référence à la **linguistique de Chomsky** N. (1956, 1957), qui définit les types de grammaires suivant :

Type 0 enumerable	$\alpha \rightarrow \beta$
Type 1 context sensitive	αAB
Type 2 context fine	γ
Type 3 regular	

L-systems = Lindenmayer-System = type de grammaire qui est une variante de la grammaire formelle. Le modèle génère une chaîne de caractères valide selon l'alphabet choisi, vérifie que sa structure est grammaticalement correcte, règle les transformations (symboles, rewriting rules)

{a, b} S

1. $S \rightarrow aSb$

2. $S \rightarrow ba$

$S \rightarrow aSb \rightarrow abab$

$S \rightarrow aSb \rightarrow aaSbb \rightarrow aababb$

Cette syntaxe permet de nommer la place et la forme des éléments obtenus. Par une sémantique formelle, on donne une signification aux symboles.

LS :

Variables (alphabet) $V = \{A, B\}$

Constants symboles $S = \{\emptyset\}$

Démarrage $w = A$

Règles $(A \rightarrow AB) (B \rightarrow A)$

Exemple :

B

A

A

A

A

B

B

A

B

A

A

B

Lindenmayer offre des formalismes mathématiques puissants mais qui ne permettent que des opérations markoviennes locales.

Triangle de Sierpinski (approche fractale)

$V = \{A, B\}$ avance

$S = \{+, -\}$ virage à gauche ou à droite avec un angle de 60°

$W = A$

$(A \rightarrow B-A-B), (B \rightarrow A+B+A)$

Le contexte est crucial :

Variable (mot paramétrique) A(2.5) B (3.14, 0.2) CA (1.3)

Règle (de réécriture)	$A(x) < B(y,z) > C \rightarrow CB(x+y, z/2)$
Nouvelle variable (mot)	$A(2.5)$

Application à un langage de paysage plus complexe car en 2D :

- Unité paysagère
- Occupation du sol
- Age de l'unité (ou temps de séjour)
- S = surface
- Distance au siège de l'exploitation (nearly the farm stead <500 m, at medium distance 500-1500 m, far from >1500 m)
- Système de production agricole

$M(l, a) \rightarrow M(l', a')$

$l' = p1l + p2(l+1) + p3(l+2)$

$a' = (a + k\Delta t)$ with $a'(n)$

On a une écriture logique calquée sur les grammaires, mais toujours sans contexte.

On part du scénario de référence (=0) = tout aléatoire = modèle neutre.

Occupation du sol, proportion d'assolement, fréquence de retour des prairies

Beaucoup de prairies et fréquence de retour élevée font que SdP bovin laitier est le plus favorable. Si des parcelles jouxtent des prairies, alors elles deviennent prairies.

Bilan de la modélisation des paysages

- Modèles de paysage à processus explicite (raster – pixel) et langage de paysage pour des applications locales (approches catégorielles)
- Modèles neutres de paysage et auto-organisation pour des approches globales d'optimisation.
- Plateformes libres.

Philippe Delcros

26/09 – Paysages et dynamique spatiale des formations ligneuses. Des modèles spatiaux-temporels aux automates cellulaires.

Classification des modèles spatio-temporels

Empiriques (descriptifs, phénoménologiques, statistiques, valables à l'échelle de la collecte de données), mécanistes (orientés-processus, fonctionnels, calés sur des lois et des équations), Stochastiques (basés sur des probabilités).

Exemples donnés en écologie végétale :

- Approches empiriques

Aire – espèces = probabiliste ou déterministe ?

Richesse spécifique = nombre d'espèces différentes = biodiversité (pas la quantité de plantes)

Relevés floristiques en présence/absence sur des carrés d'échantillonnage (pour éviter l'auto-corrélation spatiale, on éclate les placettes plutôt de les garder dans la même grille)

- Approches déterministes

Richesse moyenne par m^2

$R(1 m^2)$ = moyenne des richesses sur chacune des 100 placettes

$R(2 \text{ m}^2)$ = moyenne des richesses accumulées sur toutes les combinaisons de 2 placettes

$R(100 \text{ m}^2)$

Pour chaque couple de carrés, 1 – comparé aux 99 autres, pour détecter les nouvelles espèces apparues à chaque fois.

Courbe SAR Species Area Relationship = courbe logarithmique : plus on augmente la surface, plus on a de nouvelles espèces, moins on a de quantité d'espèces.

Richesse $\beta \times \log(\text{surface}) + \text{richesse } \alpha$

Richesse γ = limite de richesse maximum du territoire

Placettes Pl1	Pl2	Pl3	Pl4		Pl100	Probabilité nb esp./100
Espèces						
Sp1						P1
Sp2						P2
Sp3						P3
Spn						Pn

Première placette : génération stochastique d'un cortège floristique conformément aux probabilités

Seconde placette : nouvelles espèces

Estimation de la richesse spécifique sur la surface considérée : 8 espèces sur premier carré par tirage aléatoire, 10 espèces sur second carré, K espèces sur carré n.

L'approche probabiliste, plus conforme à l'irrégularité et l'hétérogénéité de la nature, permet d'aller au niveau de l'espèce.

Problèmes des modèles spatio-temporels

La validation se décompose en plusieurs étapes :

Vérification du code informatique

Validité des données

Robustesse du modèle

Stabilité des résultats

Validation sur autre site, experts.

Les problèmes que posent ces modèles pour la validation sont : leur organisation hiérarchique, le nombre important de composants et d'interactions entre les composants, les dynamiques non linéaires et dépendantes de l'homme.

Dans la modélisation des paysages, l'expert doit ordonner au modélisateur.

Quelles questions : compréhension, prévision, généralisation, stratégie de vie de certaines espèces, complexité et dynamique des paysages, localisation des individus.

Quelles variables ? Quantitatives, qualitatives ?

Dans un modèle individu-centré, chaque individu naît, se déplace, est localisé dans l'espace, meurt. Des variables = localisation, âge, sexe, état physiologique (dynamique de population) dépendent du temps et considèrent les interactions entre individus.

Exemple 1: envahissement des alpages par le pin à crochet

Le cadre est celui de la reforestation naturelle résultant de la déprise agricole. Des pins à crochets en lisière de forêts de sapin, marquent la frontière avec les alpages, avec une tendance à envahir les pelouses d'alpage. Les pins à crochet profitent de la lumière, en favorisant flore et faune, car la pression sur les pâturages diminue. Les forêts de sapin ont par contre une très faible biodiversité végétale.

Modèle de dynamique de progression des individus pins à crochet sur un pas de temps annuel
= modèle arbre centré. Strate = état, i individus.

Résultat attendu : évolution du front de colonisation ; mesures :

Distances de dissémination (modifiée par la pente)

Taux de régénération

Compétition entre pins (rayon d'influence = $f(\text{âge de l'arbre})$)

Maturité sexuelle (vers 30 ans)

Mortalité par compétition ou par sénescence ou par accident (1 sur 100 tous les 3 ans).

Exemple 2 : chevreuil dans un territoire à différentes facettes de paysage

Comportement du chevreuil : repos et recherche de nourriture, reproduction et élevage de faons, souvenir de son territoire.

Méthode : conceptualisation, données, calibration, test et validation, utilisation d'autres espaces et scénarios. On détermine la trajectoire du chevreuil (trajectométrie au collier avec capture, pose du collier, recapture, dépouillement des données du collier) et les valeurs alimentaires des différentes portions du paysage (lisières à biomasse plus élevée) :

Forêt / Broussaille / Pelouse (biomasse 3D dans les différents milieux, déterminée en boîtes cages avec prélèvement exhaustif de la végétation et tri du comestible).

Caractéristiques observées :

- Alternance de phases de repos/rumination, déplacement/alimentation
- Stochasticité dans la durée des périodes
- Territorialité (les espaces de chaque chevrete s'excluent)
- Trajectométrie ...cartographie des domaines vitaux hebdomadaires.

Trajectoires suivies avec un pas de temps de 30 secondes, trajectoire rectiligne sur t_1 , puis t_2 avec une trajectoire déviée d'un angle θ . Arrêt, changement de direction. $0 < \theta < 2\pi$

Des facteurs exogènes influencent les déplacements : saisons, unités paysagères d'offre et qualité alimentaire variables.

On simule le comportement spatial de l'animal. On teste le modèle en produisant des domaines vitaux hebdomadaires sur 3 types de milieux (A, B, C, dont on connaît la végétation), 5 mois (20 semaines), résultats moyennés sur 20 répétitions, en faisant varier le point initial A, l'angle d'ouverture de la trajectoire. Le changement d'angle à chaque repos de rumination crée un domaine vital plus vaste. Si $\theta = 30^\circ$, la chevrete va tourner en rond autour du point initial. On peut faire varier la valeur alimentaire relative des milieux : dans un milieu de valeur alimentaire très faible, la chevrete traverse le milieu à la recherche de conditions plus favorables. Si la valeur alimentaire d'un milieu est très élevée, la chevrete va y séjourner plus longtemps en se déplaçant peu. On compare la courbe des valeurs mesurées avec la courbe produite par le modèle.

Automates cellulaires

Jonh Van Neumann : systèmes auto-réplicatifs

Principe : pixels = cellules = images raster

L'état d'une cellule C à un temps $t+1$ dépend de son état à un temps t et de l'état d'un certain nombre de cellules au voisinage de C.

Dans le jeu de vie (Conway, 1970) :

- l'espace est discrétisé en cellules : [état vivant = 1, état mort = 0] 2 états,
- le voisinage d'une cellule comprend les 8 cellules contigües,
- Une cellule morte au temps t avec 3 cellules voisines vivantes devient vivante au temps $t+1$, sinon elle reste morte.

- Une cellule vivante au temps t avec 3 cellules voisines vivantes reste vivante au temps $t+1$, sinon elle meurt.

On observe des structures stables (chaque cellule vivante a 3 cellules voisines vivantes), des structures périodiques, des structures en vaisseau (les points se suivent). Les automates cellulaires sont donc des outils qui servent à simuler l'expansion spatiale de certaines formations végétales. Des descripteurs supplémentaires peuvent être l'âge, la végétation, les ressources du milieu, la topographie.

D'où l'importance des données et des protocoles expérimentaux dans les applications concrètes: incendies, formations secondaires sur alpages sur-pâturés, dissémination par graines ou expansion par marcottage.

Exemple d'automate cellulaire : Aulne vert / Tétrast – Lyre [DYNAULNE]

Envahissement des alpages par l'aulne vert lorsque la pression pastorale diminue (30 000 ha conquis depuis 1945), en conservant par extension en tâches d'huile une structure suffisamment ouverte pour intéresser encore une espèce d'oiseau Haut-tétrast, une espèce emblématique, parapluie, exigeante en termes d'habitat.

L'espèce d'oiseau à conserver désigne les compartiments habitats et l'objectif de mosaïque, donc la structure de paysage nécessaire à leur survie et reproduction. On peut modifier par simulation la qualité de l'habitat.

3 indices de paysage sortent de l'ACP :

CA (% Aulne), TE (longueur lisières), Nb (nombre de patches)

Régression logistique pour le calcul de la fenêtre centrale puis fenêtre coulissante pour le calcul sur l'ensemble de la carte.

Etat pixel : aulne ou non aulne, valeur de pente, réserve hydrique, âge.

Nucléation : au temps t , chaque cellule en aulne à maturité sexuelle a une probabilité très faible de colonisation. Scénarios testés : coupe à blanc, pression de pâturage, taux de nucléation, richesse hydrique (concave différent de convexe).

VI- Participation

Il a été démontré qu'il était possible de réunir une école internationale regroupant 41 personnes (17 intervenants dont 14 conférenciers et 24 assistants) pendant 15 jours à l'Université de Fianarantsoa. Il fallait le faire pour s'en convaincre. L'Ecole Nationale d'informatique a accueilli l'évènement dans une grande salle de classe et une salle de travaux dirigés équipée de 20 ordinateurs et connectée par internet.

L'école s'est déroulée avec 24 élèves sur les 35 prévus, essentiellement du fait de la faible participation des participants étrangers (4 confirmés sur les 6 sélectionnés alors que 12 étaient prévus). 20 élèves malgaches ont participé sur les 23 prévus, avec une inversion de la proportion des enseignants-chercheurs au profit des étudiants : 15 enseignants et 8 étudiants prévus ; 8 enseignants et 12 étudiants sélectionnés. Cette modification s'explique par la difficulté pour des enseignants de se libérer de leurs obligations de cours avant la fin du cycle universitaire pendant une durée aussi longue que 10 jours. La condition initiale de participer à l'ensemble de l'école a été ensuite assouplie en exigeant plus qu'une participation à au moins une semaine de cours (5 jours).

La représentativité des élèves de Madagascar a été satisfaisante (moitié d'Antananarivo, moitié de Fianarantsoa, et des représentants de Diego, Mahajenga, Tuléar). Par contre la représentation féminine a été très faible : 8 femmes sur 49 personnes dont 5 élèves et enseignantes. Il a manqué un enseignant et deux étudiants de La Réunion, les contacts avec

l'Université de La Réunion n'ayant pas abouti. Plusieurs candidats de l'INSCAE (Antananarivo) ont présenté trop tard leurs candidatures.

La répartition selon les disciplines et le niveau de formation académique est la suivante, est détaillée pour les assistants malgaches.

- Etudiants malgaches, assistants

2 mathématiques, 2 informatique, 2 agronomie-hydrologie, 2 écologie, 3 géophysique, 1 géographie

Ing. Agronome ESSA et thèse en cours DBEV, Antananarivo	1
Ing. Agronome ESSA et DEA foresterie, Antananarivo	1
Ing. Agronome ESSA hydrologie, projet de thèse, Antananarivo	1
DEA DBEV, Antananarivo	1
DEA Informatique ENI, informatique, projet de thèse, Fianarantsoa	1
DEA Informatique ENI, mathématique, projet de thèse, Fianarantsoa	1
Maîtrise math MISS, DEA Informatique ENI, Fianarantsoa	2
DEA Géophysique, IOGA, Antananarivo	2
DEA Géophysique, Ing. Mines, IOGA, Antananarivo	1
DEA Géographie en cours, Antananarivo	1

- Enseignants-chercheurs malgaches, assistants et conférenciers

8 mathématiciens (1 HDR, 7 MdC), 4 informaticiens (2 en thèse, 2 DEA), 1 physicien (HDR), 1 géophysicien (MdC), 2 écologues (1 HDR, 1 MdC), 1 géographe (DEA)

Mathématique, MdC, Diego	1
Mathématique, MdC, Fianarantsoa	5
Mathématique, MdC, Antananarivo	1
Mathématique, HDR, Fianarantsoa	1
Informatique, ENI, en thèse, Fianarantsoa	2
Informatique, DEA Informatique, Prof. informatique de gestion, Mahajenga	1
Informatique-physique, DEA Ing. Système, Tulear	1
Physique, HDR, ENI, Fianarantsoa	1
Géophysique, MdC, IOGA, Antananarivo	1
DEA Géographie, professionnel SAGE, Antananarivo	1
Ecologie DBEV, MdC, Antananarivo	1
Ecologie CNRE, HDR, Antananarivo	1

- Soit sur 29 participants malgaches

Disciplines : 10 mathématique, 8 agronomie-écologie-géographie, 6 informatique, 5 physique-géophysique, dont 3 HDR et 9 MdC.

Localités : 1 Diego, 1 Mahajenga, 1 Tulear, 13 Fianarantsoa, 12 Antananarivo.

Les **conférenciers** réunis pour cette école ont été 5 enseignants malgaches (2 de l'Université d'Antananarivo et 3 de l'Université de Fianarantsoa), 1 enseignant marocain, 8 enseignants français (dont 3 ont participé aux deux semaines de cours), 2 organisateurs de l'IRD et le Directeur du CIMPA. 6 conférenciers sur 14 étaient africains, soit un taux de 42%.

Le désistement de plusieurs conférenciers pressentis a contribué à resserrer le dispositif sur des laboratoires en écologie du paysage du Grand Sud de la France : INRA à Toulouse, Montpellier et Avignon ; CEMAGREF à Aix et Grenoble ; alors que les contributions se confirmaient en math-info, en mathématique (IRD à Bondy et Marrakech, INRIA à Montpellier) et en informatique (IRD à Bondy et Engees à Strasbourg).

Des personnalités s'étaient déplacées jusqu'à Fianarantsoa :

Messieurs Michel Jambu, Directeur du CIMPA, pour sa dernière école avant de prendre sa retraite ; le nouveau Directeur du Bureau Océan Indien de l'AUF ; Pierre Auger, Directeur de l'UR 079 GEODES (IRD) et Jean-Pierre Treuil, chercheur émérite au GEODES retraité de l'IRD ; Philip Roche, Directeur de l'UMR Risques (CEMAGREF) ; Didier Dacunha-Castelle (Paris Sud Orsay).

VII- Pistes de prolongement

La collaboration entre Antananarivo et Fianarantsoa a été très active en 2008, avec l'IOGA, l'ESSA forêt, les départements de géographie et biologie-écologie végétale. Elle s'est exprimée pleinement au cours de cette école. On peut donc espérer qu'une nouvelle école pourra s'organiser avant 2012 entre les universités de Fianarantsoa et d'Antananarivo.

Une collaboration Sud-Sud peut se poursuivre avec le Maroc, Université de Marrakech, sur les dynamiques de population. Des relations historiques relient le Maroc à Madagascar. Cependant ces deux pays n'appartiennent pas à la même unité géopolitique.

Une possibilité de relance de la combinatoire a été identifiée, entre les universités d'Antananarivo et de Fianarantsoa, en permettant à Monsieur Benjamin Randrianirina de renouer des collaborations avec des laboratoires à Bordeaux et Montréal : invitation à ce qu'ils visitent Fianarantsoa pour établir un état des lieux, demande de consolidation d'un fonds bibliographique, organisation d'un atelier et peut-être à terme d'un DEA.

A suggestion de l'AUF, il est proposé de monter un projet ambitieux d'une session de formation tous les 6 mois pendant 3 ans, à laquelle pourraient participer des ressortissants de l'Océan Indien. L'expérience a montré en effet que la collaboration de Montpellier à l'UF s'est traduite en 2007 par un atelier SARIMA (« Probabilités, statistiques, Scilab, quelques applications à l'environnement » par Fabien Campillo et Rivo Rakotozafy), en avril 2008 par un atelier IRD-INRA-SARIMA (Sylvie Lardon, Aurélie Toillier, Dominique Hervé), en septembre 2008 par une école CIMPA « Méthodes mathématiques et informatiques de modélisation des paysages », et que cette dynamique pouvait se prolonger à l'avenir.

De multiples contacts ont été noués en périphérie de l'Ecole, entre mathématiciens, entre écologues-géographes et mathématiciens-informaticiens, autour de la télédétection, en vue de projets de thèse. L'école a été une occasion d'information sur les institutions CIMPA, SARIMA et AUF, leurs rôles et modalités d'appui financier. L'école a permis également d'identifier les formations nécessaires à compléter sur des logiciels statistiques et de systèmes d'information géographique (-R, Fragstats, Arcview...). En ce sens, l'école CIMPA 2008 est une étape vers le renforcement des compétences malgaches en SIG, télédétection, écologie du paysage et applications des outils mathématiques et informatiques à la dynamique des paysages.

Finalement cette école a contribué à la consolidation d'un projet de création à l'université de Fianarantsoa d'un laboratoire interdisciplinaire adossé au DEA d'informatique et dédié à la modélisation des systèmes complexes.

ANNEXE 1 : APPARTENANCE DES INTERVENANTS

(en italique les intervenants pressentis qui se sont désistés...suivis de leur remplaçant)

Pierre Auger IRD, U.R. 079 Géodes Bondy

Gérard Balent Umr 1201 Inpy-Ensate/Inra Dynafor, Toulouse... Sylvie Ladet Inra Toulouse

Jacques Baudry Inra Sad Armorique, Rennes

Françoise Burel Umr 6553 Ecobio, Rennes

Fabien Campillo Irista/Inria Rennes, puis Inria-Mere, Montpellier

Philippe Delcros Cemagref Grenoble

Rémy Courdier Univ. La Réunion, Iremia puis Ecole polytechnique

Cedric Gaucherel CIRAD – AMAP Montpellier

Annick Gibon Umr 1201 Inpy-Ensate/Inra Dynafor, Toulouse

François Goreaud Cemagref, Clermont Ferrand...Pierre Couteron IRD – AMAP Montpellier

Mohammed Khaladi Université Cadi Ayyad, Marrakech

Sandra Lavorel Laboratoire d'écologie alpine, Grenoble

Florence Le Ber Engees Université de Strasbourg, Strasbourg

Pascal Marty Cefe-CNRS Montpellier

Pascal Monestiez Inra Avignon

Venot Ratiarson et Cyprien Rakotoasimbahoaka Ecole Nationale d'Informatique, Fianarantsoa

Solofo Rakotondraompiana Centre Commun de Ressources Géomatiques, Laboratoire de Géophysique de l'Environnement et Télédétection, Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

Rivo Rakotozafy Dept. Mathématiques, Université de Fianarantsoa, Fianarantsoa

Philip Roche Cemagref Aix, Imep Université Paul Cézanne, Marseille

Joelson Solofoniaina Univ. Antananarivo

Thierry Tatoni Imep Université Paul Cézanne, Marseille

Dominique Hervé IRD, UR 168 puis 199, Montpellier puis Fianarantsoa, Madagascar

Jean-Pierre Treuil IRD, UR 079, Géodes, Bondy

Répartition par nationalité des participants à l'école "MIMOPA"
15-30 septembre 2008, Fianarantsoa (Madagascar)

