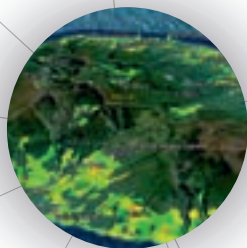
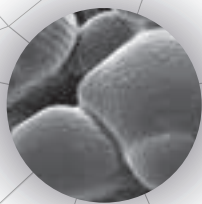


les dossiers
d'AGROPOLIS
INTERNATIONAL

*Compétences de la communauté scientifique
en région Occitanie*

SYSTÈMES COMPLEXES
de la biologie aux territoires



Numéro 23
Juin 2018

AGROPOLIS INTERNATIONAL

agriculture • alimentation • biodiversité • environnement

Implanté en Occitanie, Agropolis International réunit un ensemble exceptionnel d'organismes et d'institutions impliqués dans les sciences vertes.

Fondée par les établissements régionaux de recherche et d'enseignement supérieur, avec le soutien de l'État et des collectivités territoriales, l'association Agropolis International est, depuis son origine, un espace de travail dédié au collectif.

Ainsi, Agropolis International met en lien les différents acteurs investis dans les domaines de l'Agriculture, l'Alimentation, l'Environnement et la Biodiversité :

- Les institutions de la communauté scientifique régionale
- Les organismes de recherche étrangers et internationaux
- Les collectivités territoriales
- Des acteurs du transfert, de l'innovation, du développement économique
- Des structures de la société civile

En rassemblant un aussi grand nombre d'institutions et en s'appuyant sur une communauté scientifique d'une telle importance, **Agropolis International est devenu le premier pôle de France en agro-environnement, orienté vers les problématiques de la Méditerranée et les pays du Sud.**

Espace d'échanges et de dialogues, de formation et de capitalisation des savoirs, laboratoire d'idées, structure d'appui aux projets collectifs et de promotion à l'international, lieu d'accueil de structures et d'événements... Agropolis International décline et adapte son savoir-faire acquis depuis plus de 30 ans, dans les grandes missions que lui confient ses membres.

La communauté scientifique Agropolis International est structurée en grands domaines thématiques correspondant aux grands enjeux scientifiques, technologiques et économiques du développement.

Les thématiques de recherche et d'enseignement de la communauté d'Agropolis International :

- Agronomie, plantes cultivées et systèmes de cultures, agro-écosystèmes
- Alimentation, nutrition, santé
- Biodiversité et écosystèmes aquatiques
- Biodiversité et écosystèmes terrestres
- Eau, ressources et gestion
- Économie, sociétés et développement durable
- Écotecnologies
- Interaction hôte-parasites et maladies infectieuses
- Modélisations, information géographique, biostatistiques
- Production et santé animales
- Ressources génétiques et biologie intégrative des plantes
- Une filière emblématique : la vigne et le vin

Quelques chiffres de la communauté scientifique Occitanie Est :

- 27 institutions d'enseignement supérieur et de recherche
- 35 infrastructures de recherche ouvertes interinstitutionnelles et interdisciplinaires
- 150 parcours de formation
- 2 700 chercheurs et enseignants répartis dans 74 unités de recherche
- 300 chercheurs expatriés dans 50 pays
- 5 000 étudiants français et internationaux
- 1 000 chercheurs internationaux accueillis

Compétences de recherche en région Occitanie sur les « systèmes complexes »

Le 1^{er} janvier 2016, les anciennes régions Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées fusionnaient pour devenir la nouvelle région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée (réforme territoriale de 2015). Aussi, ce numéro de la série *les dossiers d'Agropolis International* présente des acteurs scientifiques conduisant des activités de recherche en lien avec les systèmes complexes et, pour la première fois, sur l'ensemble de cette nouvelle région. Cette communauté scientifique regroupe 44 équipes de recherche (unités de recherche, de service, équipes d'accueil et de projet, observatoires). Plusieurs structures fédératives animent et coordonnent les activités scientifiques de ces équipes : un institut, six « laboratoires d'excellence » (LabEx), un « équipement d'excellence » (EquipEx) et un « Institut Convergences ». Enfin, plusieurs infrastructures de recherche et des centres de données et de calculs, d'envergure nationale et européenne, existent également en Occitanie et constituent des dispositifs essentiels au traitement des systèmes complexes.

Ce dossier, initié en 2013 par Fabien Boulrier et finalisé par Isabelle Amsallem (Agropolis International), vise à mieux faire (re)connaître la communauté montpelliéraine des systèmes complexes dans le cadre du Réseau national des systèmes complexes (RNSC). Depuis, l'ouverture à la communauté toulousaine a fait de cet ensemble Occitanie un des dispositifs significatifs dans le domaine aux niveaux national et européen ! Agropolis International est bien ici dans ses fonctions de mise en valeur des compétences scientifiques de cette nouvelle région dans un domaine qui est clairement sorti d'une certaine marginalité initiale. Il devient de plus en plus nécessaire, aussi bien intellectuellement que du point de vue opérationnel, de ne pas commencer par chercher à réduire la complexité des phénomènes étudiés et qu'il faut se donner les moyens de les aborder dans la richesse des interactions d'un monde qui enchevêtre de plus en plus processus sociaux et naturels !

Sans être exhaustif, ce dossier a ainsi pour ambition d'offrir au lecteur un panorama de ces acteurs scientifiques régionaux à travers des exemples concrets d'activités qu'ils développent en lien avec les systèmes complexes selon trois grands champs thématiques : Collecte et gestion des données ; Compréhension et analyse des systèmes complexes ; Modes d'utilisation de l'approche « systèmes complexes ».

Enfin, parmi les nombreuses formations dispensées en région Occitanie, diplômantes ou non, en lien avec les « systèmes complexes », seuls quelques exemples de formations consacrées spécifiquement à une meilleure maîtrise conceptuelle ou instrumentale des systèmes complexes, sont présentés. Toutefois, il existe un large choix de formations diplômantes (de bac+2 à bac+8) qui abordent le champ des « systèmes complexes ». La liste de ces formations est disponible sur le site d'Agropolis International (www.agropolis.fr/formation) et de l'Université Fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées (www.univ-toulouse.fr/formation/formation-toutau-long-de-la-vie/trouver-uneformation).

Bernard Hubert
Conseiller du Président d'Agropolis International

Systemes complexes de la biologie aux territoires

Avant-propos

4

Systemes complexes, collecte et gestion des données

7

- Récolte des données 9
- Mise en sens des données 12
- Mise à disposition : accessibilité et interopérabilité des données 19

Compréhension et analyse des systèmes complexes

23

- Dynamique des organismes 25
- Dynamique des populations 33
- Dynamique des écosystèmes 40
- Gestion des territoires 46

Mode d'utilisation de l'approche « systèmes complexes »

55

- Usage des observatoires 57
- Aide à la décision multicritère 60
- Participation et concertation 64
- Nouveaux modèles pour la décision 68

Les structures fédératives de recherche en lien avec les systèmes complexes

70

Thématiques couvertes par les structures de recherche

72

Les formations dans le domaine des « systèmes complexes » en Occitanie

76

Liste des acronymes et abréviations

78

Photos de couverture :
Méristème apical d'*Arabidopsis thaliana* © Jan Traas
Simulation stochastique d'un manguier © F. Boudon/Cirad/Inria
Distribution spatiale de la densité d'*Aedes Albopictus* dans l'île de La Réunion.
© Annelise Tran/Cirad/Projet Alborun (ARS Océan Indien)
Illustration issue de pixabay sous © CC0 public domain

Avant-propos

Depuis une trentaine d'années, les systèmes complexes sont devenus un champ de recherche qui traverse l'ensemble des disciplines. À la suite des pionniers durant les années 1980 — le *Santa Fe Institute* aux États-Unis et le centre de recherche animé par Ilya Prigogine à Bruxelles —, des centres de recherche sur les systèmes complexes sont apparus en Italie, en Espagne, au Royaume-Uni, en Pologne, en Hongrie et en France. Les chercheurs ont créé une association internationale (*Complex Systems Society*¹), des revues spécialisées, et des conférences internationales se tiennent régulièrement. Le champ est particulièrement bien structuré en France avec des centres régionaux (Paris-Île-de-France, Rhône-Alpes, Toulouse, Rennes, Normandie) et des réseaux thématiques, l'ensemble étant intégré dans la structure d'animation et de réflexion du Réseau national des systèmes complexes (RNSC). Dans le domaine qui est celui d'Agropolis International, il nous est paru important de faire un inventaire raisonné des recherches qui touchent aux systèmes complexes en Occitanie, du vivant à l'environnement et la gestion des territoires, invoquant aussi bien la biologie que l'écologie, la géologie, l'hydrologie ou l'agronomie et les sciences humaines et sociales. Les approches sont souvent modélisatrices mais reposent aussi bien sur des données quantitatives que qualitatives.

Mais qu'entend-on par systèmes complexes ? Dans un article paru dans *Natures Sciences Sociétés*², il est fait mention du démon défini par Laplace en 1814³ comme « une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose embrasserait dans la même

formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux ». Ce qui suppose de connaître la situation initiale de tous les êtres de l'univers — il s'agit du problème de la donnée — et de connaître toutes les lois de la nature — il s'agit du problème de la dynamique. La science contemporaine a détruit ce rêve d'un tel démon : par la physique quantique qui a introduit une incertitude irréductible qui rend impossible de connaître l'état de l'univers à un moment donné, par la théorie du chaos qui montre qu'une différence initiale infime peut engendrer des comportements complètement différents (l'effet du papillon qui provoquerait un cyclone ou pas), par le problème de l'interaction dynamique des échelles qui, dans bien des cas, rend le comportement global impossible à déduire des seules propriétés des entités élémentaires ; ce qu'on appelle l'émergence. Comprendre les défis de notre temps, notamment concernant l'adaptation aux changements globaux et la gestion à l'échelle de territoires, agir sur ces grands systèmes qui présentent des dynamiques d'interactions multi-échelles, des phénomènes de cascade, de rétroaction, et d'émergence nécessite de concevoir des outils nouveaux au croisement des disciplines et des *Big Data* et rassemblés sous l'appellation « sciences de la complexité ». Ces outils ne peuvent relever d'une seule discipline scientifique et nécessitent des compétences et pratiques plus intégrées entre expérimentations de terrain et modèles. Toutes ces dimensions qui caractérisent la complexité aujourd'hui sont abordées avec des méthodes renouvelées par nos laboratoires de recherche, et nous souhaitons en faire un panorama, même partiel, dans ce dossier.

1. <http://cssociety.org>

2. Deffuant Guillaume, Banos Arnaud, Chavalarias David, Bertelle Cyrille, Brodu Nicolas, Jensen Pablo, Lesne Annick, Müller Jean Pierre, Perrier Edith, Varenne Franck. Visions de la complexité : le démon de Laplace dans tous ses états. 2015. *Natures Sciences Sociétés*, 23 (1) : 42-53.

3. Laplace, P.S., 1814. Essai philosophique sur les probabilités, Paris, Courcier.

Pour cela, nous avons décidé de structurer ce document en trois grandes parties :

La première partie traite justement de la donnée, parfois présente en grande masse, indispensable pour connaître l'état du système que nous étudions. Nous n'avons jamais eu autant de capteurs à toutes les échelles du microscopique aux images satellites, en passant par la traçabilité de nos déplacements et de nos échanges dans les réseaux sociaux, engendrant une quantité énorme d'informations, souvent hétérogènes, qu'il s'agit de collecter, de traiter, d'intégrer et à laquelle il faut donner sens par assimilation à nos modèles de fonctionnement. Des infrastructures apparaissent en France et en Europe pour fournir ces données mais aussi pour les stocker et les traiter.

La seconde partie aborde justement le fonctionnement des systèmes puisqu'il ne s'agit pas seulement de décrire (première partie) mais de comprendre comment les systèmes complexes fonctionnent. Pour cela, nous avons organisé les contributions selon les échelles des systèmes étudiés, allant de l'intracellulaire au fonctionnement des géoécosystèmes et des

territoires (c'est-à-dire de l'espace anthropisé ou mieux de l'éco-sociosystème) en passant par les individus (plantes ou animaux), les populations et les écosystèmes (pensés donc sans l'homme, mais est-ce encore faisable ?). De nombreuses méthodes sont élaborées pour rendre compte de ces fonctionnements complexes reposant sur des équations différentielles, des réseaux, ou des modèles individus-centrés ainsi que leur combinaison en fonction des échelles d'analyse.

Enfin, la troisième partie traite de l'utilisation de l'approche par les systèmes complexes pour résoudre les défis contemporains. Nous allons de l'organisation, à la fois technique et sociale, de l'observation des systèmes par ce qu'on appelle justement des observatoires, à la gestion participative prenant en compte une multiplicité d'enjeux, en passant par les systèmes d'aide à la décision, notamment selon des perspectives multiples.

**Nicolas Arnaud (UMR GM),
Bertrand Jouve (XSYS)
et Jean-Pierre Müller (UPR Green)**

← Observation
Europe de l'Ouest

59% 16:27

OBSERVATION

RÉSULTATS

① *Punica granatum L.*
Grenadier



CONFIRMER

① *Papaver rhoeas L.*
Coquelicot



Systemes complexes, collecte et gestion des donnees

Les systemes qui sont abordes dans ce dossier, quel que soit leur domaine — ecologie, biologie, sante, societe, environnement, economie —, relèvent du paradigme des systemes complexes. Plusieurs theories peuvent être invoquées pour les analyser comme, par exemple, l'approche systemique qui propose trois axes d'analyse : structure, fonctionnement, dynamique.

Le chapitre 1 est dédié à la collecte et à la gestion des données, un choix légitime en ceci que les données sont primordiales pour appréhender les systemes dans leur complexité, les analyser et en concevoir les modèles qui permettront de les comprendre, voire de projeter leur évolution. Ce chapitre aborde tout d'abord l'observation, qui permet, dans différentes conditions, de recueillir les données initiales, puis les traitements qui permettent de valider ces données, de les fiabiliser et les « façonner » pour les rendre partageables et intégrables aux chaînes de traitement à des fins d'analyse et de modélisation. Enfin, les moyens déployés pour faciliter leur accès et leur partage sont également présentés.

La première partie de ce chapitre s'intéresse à la récolte des données. Compte tenu de la variété des domaines mais aussi de la complexité intrinsèque des systemes, les données collectées sont elles aussi très diverses et souvent nativement hétérogènes. Leur collecte demande des protocoles adaptés, appuyés sur des capteurs humains ou instrumentaux, mis en œuvre dans des organisations plus ou moins élaborées. Ainsi, dans cette section sont présentées :

- une initiative collective liée au recensement de la biodiversité végétale par l'intermédiaire de vastes réseaux d'observateurs et d'applications mobiles ;
- des expériences menées dans des projets pluridisciplinaires autour de questions environnementales grâce à l'apport des capteurs interfacés ;
- des expériences fondées sur des observations satellitaires pour l'étude des systemes environnementaux complexes ;
- enfin, la mise en œuvre de capteurs logiciels élaborés dans le cadre d'analyses plus formelles.

Les données collectées doivent étayer la compréhension du système étudié et les hypothèses formulées et, pour cela, doivent être « interprétées » grâce à divers traitements ou chaînes de traitements relevant d'approches numériques ou symboliques, après s'être assuré de leur qualité. La deuxième partie aborde la mise en sens de ces données à travers différents articles qui présentent :

- la question primordiale de la qualité des données ainsi que les nécessaires stratégies de détection d'anomalies et de mise en œuvre de prétraitement, de rectification et de consolidation de ces données, effectuées grâce à divers prétraitements ;
- un exemple de chaîne de traitements complète aboutissant à une proposition de modélisation de l'évolution karstique de l'aquifère du Lez ;
- une méthodologie pour élaborer un outil prédictif préopératoire en anatomie cérébrale, basée sur une modélisation réalisée à partir de chaînes de traitements issues de l'imagerie par résonance magnétique ;
- un système d'assimilation de données dérivées de l'imagerie satellitaire (humidité superficielle des sols et surface foliaire) pour améliorer à l'échelle mondiale l'estimation des quantités de carbone absorbées par la végétation par photosynthèse ;
- une construction de connaissances élaborée par croisement de recueils de données diverses (observations spatiales et terrain, enquêtes, outils participatifs) pour répondre à des questions de développement local en Afrique australe ;
- la production d'un système de connaissances pluridisciplinaires par modélisation multi-agent à partir de travaux sur les petits rongeurs et leurs parasites menés à différents niveaux, depuis le gène jusqu'à l'écosystème ;

- une démarche de conceptualisation d'agrosystemes sous la forme de graphes permettant d'intégrer et d'interroger des connaissances pluridisciplinaires et des expertises, appliquée au cas du dépérissement de ceps de vigne du cépage syrah ;
- une approche de modélisation qualitative pour appréhender le fonctionnement des assemblages microbiens ;
- une méthodologie d'analyse d'images satellitaires à partir de raisonnements fondés sur des ontologies.

La disponibilité et la diffusion de la donnée sont essentielles à son utilisation, sa réutilisation et donc sa valorisation maximum, par tous les porteurs d'enjeux qui en éprouvent le besoin. Mais plusieurs problèmes ouverts existent autour des données : peut-on et comment y accéder aisément, les utiliser facilement (même quand on est un public non averti) ? Comment les partager au mieux et assurer leur pérennité ? La dernière partie de ce chapitre s'intéresse à cette mise à disposition et utilisation simples des données à travers différents exemples :

- Le système d'information de l'Observatoire des Sciences de l'Univers OSU OREME (Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement) collecte et référence, par des métadonnées normées et basées sur des vocabulaires contrôlés, des données environnementales diverses. Il offre aussi une pléiade d'outils de visualisation interactifs permettant le croisement de données.
- Une proposition de stockage intelligent : le lac de données permet la collection de données non formatées, munies de catalogues et de règles de gouvernance diverses.
- Une approche relative à la mise en correspondance de données massives et hétérogènes fondée sur la définition de l'hétérogénéité et la variété des données environnementales.

Enfin, des encadrés présentent plusieurs dispositifs et outils qui appuient la communauté scientifique pour la collecte et la gestion des données :

- L'OSU OREME est un observatoire de données environnementales qui soutient des activités interdisciplinaires notamment dans le contexte méditerranéen.
- L'équipement d'excellence (EquipEx) GEOSUD met à disposition de la communauté scientifique et des acteurs des politiques publiques des bouquets d'images satellitaires et des services de traitements. Il constitue un des piliers du pôle thématique Theia.
- Enfin, le Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur propose des moyens de stockage et d'archivage massifs ainsi que des clusters de calcul numérique à haute performance.

Nicolas Arnaud (UMR GM),
Thérèse Libourel (UMR ESPACE-DEV)
et Pierre Maurel (EquipEx GEOSUD)

Systemes complexes, collecte et gestion des donnees

Les structures de recherche developpant des activites sur une (ou plusieurs) thematique(s) de ce chapitre sont consignees dans le tableau ci-dessous. La couleur vert foncé ■ indique une thematique dans

laquelle une equipe developpe principalement ses activites, le vert clair ■ une thematique dans laquelle elle est egalement impliquee. L'emplacement d'un article est signale par un numero de page.

- 1.1. Recolte des donnees
- 1.2. Mise en sens des donnees
- 1.3. Mise a disposition : accessibilite et interoperabilite des donnees

Structures de recherche** Collecte et gestion des donnees	1.1	1.2	1.3
AMAP • botanique et Modelisation de l'Architecture des Plantes et des vegetations	p. 9		
ASTRE • Animal, Sante, Territoires, Risques & Ecosystemes		p. 15	
B&PMP • Biochimie et physiologie moléculaire des plantes			
CBGP • Centre de Biologie pour la Gestion des Populations		p. 16	
CeMEB • Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité			
CEFE • Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive			
CINES • Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur			p. 21
CNRM • Centre National de Recherches Météorologiques		p. 14	
DIMNP • Dynamique des Interactions Membranaires Normales et Pathologiques			
DYNAFOR • Dynamiques et écologie des paysages agriforestiers	p. 10		
Eco&Sols • Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols & agro-écosystèmes		p. 18	
ESPACE-DEV • Espace pour le développement		p. 12/18	
GEODE • Géographie de l'Environnement			
GEOSUD • GEOinformation for Sustainable Development			p. 21
GREDE • Gouvernance, Risque, Environnement, Développement			
HSM • HydroSciences Montpellier		p. 12	
IMFT • Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse			
IRIT • Institut de Recherche en Informatique de Toulouse			
ISE-M • Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier	p. 9		
ITAP • Information-Technologies-Analyse environnementale-Procédés agricoles			
L2C • Laboratoire Charles Coulomb		p. 13	
LBE • Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement	p. 11	p. 18	
LGP • Laboratoire Génie de Production			
LIRMM • Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier	p. 9		p. 20
LISST • Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires			
MISTEA • Mathématiques, Informatique et Statistique pour l'Environnement et l'Agronomie	p. 11	p. 18	
MIVEGEC • Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle			
Numev • Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant			
OREME • Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement			p. 19
SMS • Structurations des Mondes Sociaux			
SYSTEM • Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens		p. 17	
TETIS • Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale	p. 10		p. 20
TULIP • Towards a Unified theory of biotic interactions : role of environmental Perturbations			
Virtual Plants • Institut national de recherche en informatique et en automatique			
XSYS • Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse			
#DigitAg • Institut Convergences Agriculture Numérique			

** Un tableau détaillé récapitulatif des structures de recherche en Occitanie et de l'ensemble des thématiques couvertes dans ce dossier est présenté page 72.

Récolte des données

Optimisation du recensement de la biodiversité végétale par de vastes réseaux d'observateurs

L'explosion récente des outils et applications mobiles, couplée au développement des nombreuses initiatives de sciences participatives, a permis l'émergence de vastes réseaux d'observatoires de la biodiversité. Grâce aux outils numériques mobiles et connectés, ces réseaux disposent de capacités de production et d'analyse de données d'observations de terrain rarement atteintes. Avec l'initiative PI@ntNet, plateforme dédiée à l'identification de plantes et au partage d'observations botaniques, plusieurs dizaines de milliers de personnes contribuent chaque jour au recensement de la biodiversité végétale (Europe, Amérique, Afrique). Ces participants disposent d'outils d'identification automatisés qui s'appuient sur des algorithmes d'analyse d'images en temps réel. Ils peuvent ainsi produire et partager de nombreuses observations de terrain, et contribuer à l'évaluation de la qualité des données. En fonction de leur évaluation qualitative collaborative, ces observations sont utilisées pour différents services de la plateforme et travaux de recherche.

Le profil des participants est varié (randonneurs, jardiniers amateurs, agriculteurs, chercheurs...) tout comme leurs comportements et implications dictés par leur intérêt (qui reste toutefois difficile à cerner) pour un type de données défini (observations sur des terrains particuliers

ou de groupes de plantes précis, analyse de la qualité des données selon un contexte géographique, taxonomique ou thématique précis). En effet, la typologie des données d'intérêt, propre à chaque participant, dépend de nombreux facteurs (volume de données produites ou analysées, ancienneté d'implication, volume des données disponibles...). Cette typologie représente l'une des clés de la pérennisation de l'implication des participants. L'unité mixte de recherche (UMR) AMAP et l'équipe Zenith de l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) développent des algorithmes permettant une meilleure prise en compte de l'intérêt des participants, à partir de l'analyse des données qu'ils produisent. Ces travaux permettront, à terme, d'optimiser l'implication des vastes réseaux mobilisés à travers la plateforme PI@ntNet, pour mieux répondre aux attentes des participants et optimiser leur implication notamment pour la production et l'analyse de données d'intérêt pour eux et pour le projet de recherche sous-jacent.

Contact : contact@plantnet-project.org

Collaborateurs : P. Bonnet (UMR AMAP), A. Joly (Inria, Équipe Zenith, UMR LIRMM), H. Goëau (UMR AMAP), A. Affouard et J.-C. Lombardo (Inria, Équipe Zenith, UMR LIRMM)

Plus d'informations : <https://plantnet.org>

Illustration : voir page 6

Apport des capteurs connectés

Depuis quelques années, la diversité des capteurs utilisables, et la fréquence souhaitée des mesures, conduisent les chercheurs à concevoir et utiliser des systèmes d'acquisition autonomes pour collecter les données nécessaires à l'observation des milieux naturels. À cette fin, divers projets ont amené des chercheurs à réaliser des choix sur les données à acquérir, le protocole de mise en œuvre et les capteurs à utiliser, notamment :

- l'alimentation du système embarqué : selon la complexité du système, par batterie ou par apport externe (cellules solaires, réseau EDF) ;
 - la taille du système et donc le nombre et la technologie des capteurs embarqués ;
 - la quantité de données à acquérir et à transmettre ;
 - le mode de transmission des données (et donc la quantité de données transmissibles et le délai de transmission) : stockage (clef USB), transmission par WIFI, réseau GSM, etc. ;
 - la fréquence d'acquisition des données liée au mode de transmission.
- À noter, le prétraitement des données, possible grâce aux processeurs à très faible consommation, minimise leur transmission en réalisant une première interprétation ;
- la résistance des matériels souvent sensibles aux agressions extérieures (température, humidité...)

- l'acquisition de données issues de capteurs exige la localisation précise des capteurs fixes et l'ajout d'un capteur de géolocalisation (souvent GPS) dans le cas de systèmes d'acquisition mobiles.

Selon les projets, les capteurs mis en œuvre sont variés :

- Pour étudier l'impact des facteurs abiotiques du milieu sur le mode de vie et le comportement d'espèces animales en conditions naturelles, l'acquisition des données est réalisée par des capteurs de type luxmètre, capteur de température, d'hygrométrie, de salinité, de pH, de conductivité, d'hauteur d'eau et par différents types d'imagerie (infrarouge...).
- Pour collecter, stocker et traiter des données écologiques afin de qualifier et décrire les mouvements de faune, les animaux sont suivis par radiopistage GPS/GSM grâce à des balises spécifiques. Les drones et les nanosatellites universitaires ouvrent des perspectives prometteuses particulièrement dans des zones où les infrastructures réseau sont peu développées.

Contacts : G. Despau ((UMR IES, Institut d'Électronique et des Systèmes), gilles.despau@umontpellier.fr;

L. Gavotte (UMR ISEM), laurent.gavotte@umontpellier.fr

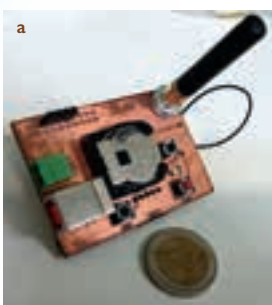
Remerciements : C. Moulia (UMR ISEM), T. Libourel (UMR ESPACE-DEV), L. de Knyff (UMR LIRMM)

▼ Quelques exemplaires de capteurs.

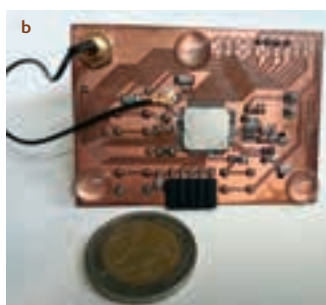
© Laurent de Knyff



▲ Datalogueur multicapteurs pour environnements aquatiques.



▲ Transmetteur de données très longue portée et ultra faible consommation pour capteurs environnementaux en zone peu accessibles. (a) Vue de dessus avec antenne et pile bouton (b). Vue de dessous avec microcontrôleur et transmetteur radio fréquence intégré.



▲ Traceur GPS communiquant multicanaux pour le suivi de position d'animaux.

Observation satellitaire pour l'étude des systèmes environnementaux complexes

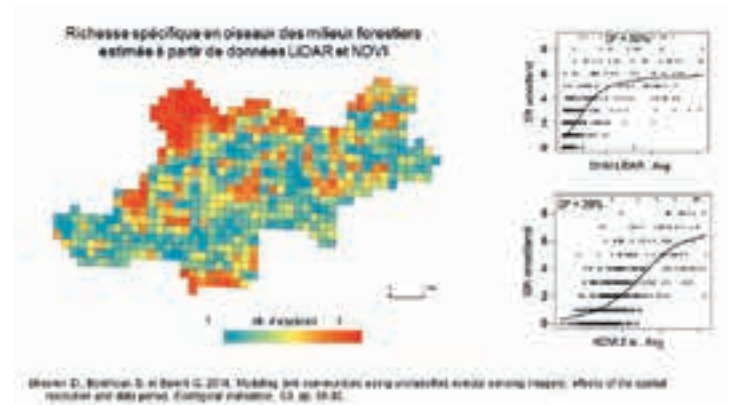
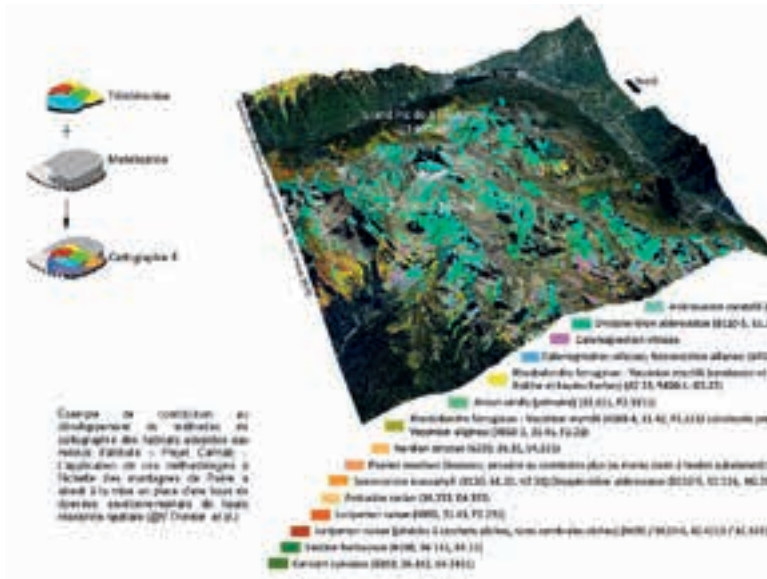
L'amélioration récente des capacités d'observation de la Terre (nouveaux satellites, accès mutualisé aux images) couplée aux progrès en traitement de données massives et hétérogènes permettent de suivre plus finement les systèmes environnementaux complexes. La télédétection est fortement mobilisée pour étudier les systèmes socio-écologiques que sont les paysages avec leur dynamique. Elle offre des moyens d'identifier certaines pressions et pratiques anthropiques (urbanisation, pratiques agricoles et sylvicoles), de caractériser des processus écologiques qui se manifestent à différents niveaux d'organisation de l'écosystème et à différentes échelles spatiales et temporelles (croissance, production de biomasse, phénologie) ou de cartographier le résultat de ces interactions (enfrichement, intensification). Les tendances d'évolution des phénomènes (rupture, gradient, cycle) peuvent aussi être identifiées de même que certaines « variables essentielles de la biodiversité » : présence et abondance d'espèces, richesse locale, distribution spatiale de communautés. Ces indicateurs sont obtenus grâce à la combinaison de l'information spatiale et spectrale, sans nécessairement passer par la production de cartes d'occupation des sols. Leur estimation, par modélisation et couplage avec la télédétection, repose sur la synergie

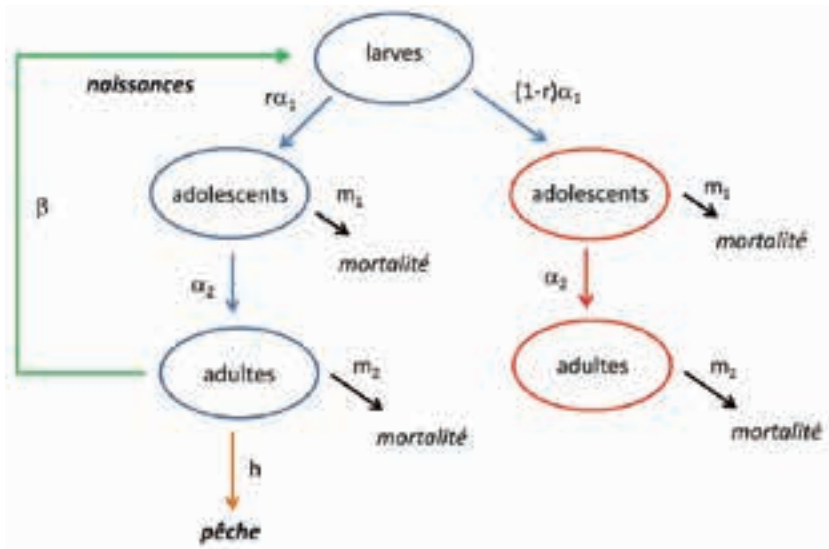
entre les mesures *in situ* et celles effectuées sur les images. Les travaux développés par les unités de recherche sur ce volet ont permis, par exemple :

- la détection d'infrastructures agro-écologiques et continuités écologiques ;
- la discrimination d'essences forestières par série temporelle d'images et la caractérisation de la structure des peuplements par des mesures LiDAR ;
- la cartographie physionomique des habitats de végétation naturelle à l'échelle de la France et la caractérisation de prairies permanentes (richesse, pratiques) ;
- le développement de modèles de distribution d'espèces à large et moyenne échelles (par ex. modèle oiseau-habitat) et la prédiction de certains services écosystémiques (régulation, production) ;
- la cartographie de services, y compris culturels, en lien avec la valeur de la biodiversité afin de mieux comprendre les systèmes socio-écologiques ;
- la dynamique spatio-temporelle d'un paysage forestier et son effet sur la biodiversité.

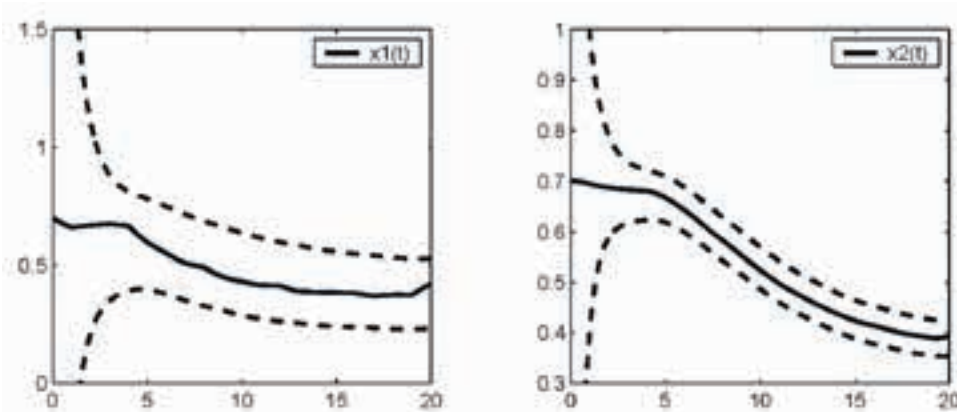
Contacts : S. Luque (UMR TETIS), sandra.luque@irstea.fr, D. Sheeren (UMR DYNAFOR), david.sheeren@ensat.fr

A télécharger gratuitement : *A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring EBVs in Tropical Forests with Remote Sensing (GEO BON website)* à <http://geobon.org/products/books>





▲ Figure 1. La seule observation des effectifs des adultes non féconds (en rouge) permet de reconstruire au cours du temps toutes les autres populations.
D'après De Dreuzy J.R. et Rapaport A., 2013. Mieux gérer les ressources naturelles, Les mathématiques de la Terre, TDC (Textes et Documents pour la Classe). 1062: 20-23.



▲ Figure 2. Les effectifs x_1 et x_2 (en traits pleins) ne sont pas mesurés. Les courbes en pointillés représentent les encadrements garantis fournis par un observateur par « intervalles ».
D'après Rapaport A. et Gouzé J.L., 2003. Parallelotopic and practical observers for nonlinear uncertain systems. International Journal of Control. 76(3): 237-251. <https://doi.org/10.1080/0020717031000067457>

À propos de capteurs logiciels pour les bioprocédés

En biologie, il arrive fréquemment que les capteurs disponibles ne mesurent pas en continu toutes les grandeurs décrivant l'avancement des réactions (ou sont peu fiables ou trop onéreux). Grâce à un modèle mathématique, on peut néanmoins reconstruire au cours du temps ces grandeurs non mesurées en fonction des autres mesures disponibles, à l'aide de capteurs logiciels (par exemple, le filtre de Kalman). La construction de ces capteurs logiciels requiert des conditions mathématiques précises, notamment la propriété d'observabilité (c.-à-d. la possibilité de reconstruire l'état du système à partir des observations). Bien entendu, tout n'est pas possible. L'étude de cette propriété permet de choisir les capteurs (parmi ceux disponibles) permettant la reconstruction des variables non mesurées (cf. fig. 1 ci-dessus).

Pour des systèmes complexes ou en grande dimension, le choix des capteurs n'est pas toujours intuitif. Il arrive aussi que des termes du modèle biologique soient mal connus ou incertains (par ex. taux de croissance en fonction du climat). Lorsque les informations statistiques

ne sont pas assez riches pour justifier des hypothèses probabilistes sur l'incertain, mais que les termes mal connus sont « fonctionnellement » bornés, on peut mettre en place des « observateurs par intervalles ». Au lieu de moyennes et variances, on détermine au cours du temps des valeurs inférieures et supérieures garanties pour chacune des variables non mesurées. On obtient ainsi une paire de capteurs logiciels et non plus un seul (cf. fig. 2 ci-dessus). Cette approche « garantie » est bien adaptée aux transitoires des bioprocédés (enceintes contenant des microorganismes qui assurent la transformation de la matière tels que les fermenteurs, digesteurs ou les bioréacteurs de purification des eaux), où il y a risque de disparition des biomasses lorsque leurs concentrations sont trop faibles, ce qu'il faut détecter au plus tôt. Sur le plan mathématique, cette technique repose sur la propriété de « coopérativité » des systèmes dynamiques, qui n'est pas nécessairement vérifiée par les modèles mais qui peut être appliquée de façon plus conservative sur des combinaisons de variables.

Contacts : J. Harmand (UPR LBE), jerome.harmand@inra.fr,
A. Rapaport (UMR MISTEA), alain.rapaport@inra.fr

Mise en sens des données

Stratégies de détection des anomalies dans les données, de rectification et de consolidation

Automatiser la détection des anomalies dans un jeu de données et, plus largement, lors de l'analyse des données issues de systèmes complexes est une tâche essentielle. Elle affecte les prises de décision faites à partir des données et elle fait largement appel à des domaines tels que l'apprentissage automatique, les statistiques et la fouille des données. La nature des données, les informations associées (ou métadonnées), les types d'anomalies à considérer, leur intrication, ainsi que le type de résultat à fournir pour caractériser le système en question vont déterminer non seulement le choix de l'algorithme à utiliser mais également toute la chaîne de prétraitement, de nettoyage, de correction, de fusion et de consolidation des données. Tous ces aspects sont des éléments-clés d'un problème de détection et ils sont au cœur de nos compétences et de nos travaux de recherche. Une fois les anomalies détectées, il est souvent possible de les corriger dans une certaine mesure et pour cela, il est nécessaire de faire appel aux experts du domaine d'application afin qu'ils vérifient et valident les résultats obtenus par différentes stratégies de correction et de consolidation au moyen de contraintes, de règles et de connaissances spécifiques du domaine.

L'interprétabilité de nos résultats (de façon à ce qu'ils soient explicables et compris aisément par les utilisateurs finaux) est alors cruciale pour permettre de raffiner, paramétrer et, enfin, valider les stratégies de détection et de correction des anomalies dans un contexte appliqué.



▲ Domaines clés de la détection d'anomalies.

Contact : L. Berti-Equille (UMR ESPACE-DEV), laure.berthi@ird.fr

Modélisation de la karstogenèse de l'aquifère karstique du Lez (Hérault, France)

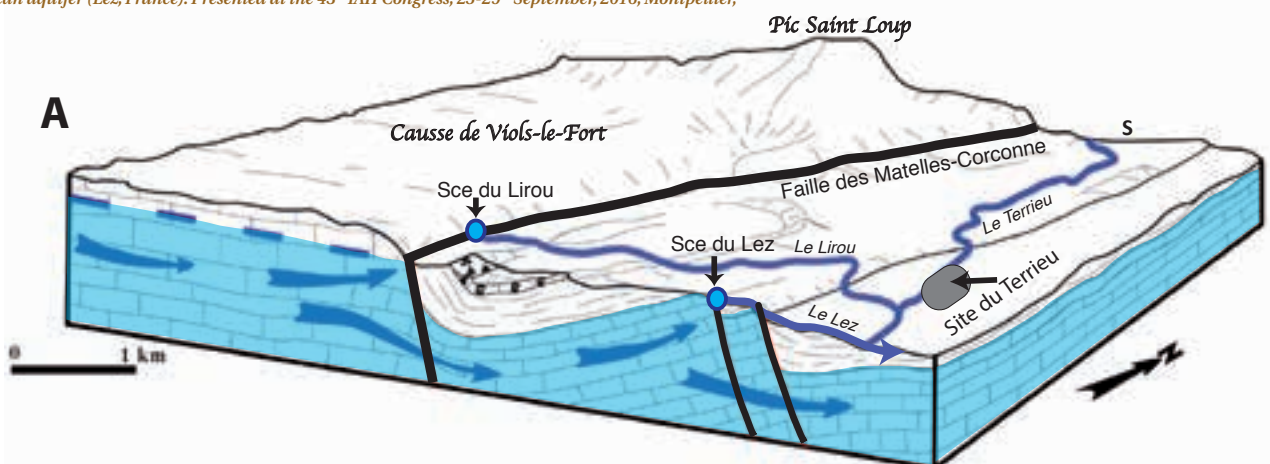
Dans le sud-est de la France, les aquifères karstiques se caractérisent par la surimposition de nombreuses phases de karstification. Dans ce contexte méditerranéen, la période messinienne (6 à 5.3 Ma), provoquant un abaissement conséquent du niveau de la mer Méditerranée (jusqu'à -1 500 m), a été clairement identifiée comme la période clé de la karstification des aquifères carbonatés du pourtour méditerranéen. Cependant, d'autres études prouvent l'existence de périodes de karstification antérieures à la crise messinienne. Ainsi l'histoire d'un karst polyphasé, se résume par deux questions scientifiques majeures : (1) Quelles sont les différentes phases de karstification qui ont impacté notre réseau actuel ? (2) Comment quantifier ces impacts afin de proposer une image la plus juste possible de la distribution du réseau dans l'espace ?

Afin de répondre à ces questions, une modélisation de l'évolution karstique polyphasé de l'aquifère du Lez (Hérault, France) a été réalisée (figure ci-dessous). Ces premiers tests de modélisation montrent qu'un plan de karstification majeur, qui affecte l'aquifère à l'échelle régionale, localisé à l'interface des formations carbonatées d'âge Berriasien-Jurassique, a une origine précoce d'âge fin Jurassique. Ce plan est repris par la karstification lors des phases récentes, concentrant l'évolution de la karstification dans cette zone. Ce plan ne pouvant se réaliser qu'avant le dépôt sédimentaire du Berriasien d'après les divers tests de modélisation, l'existence d'un épikarst à la fin du Jurassique sur l'ensemble de notre domaine semble l'explication la plus cohérente, en accord avec les observations réalisées à l'Est de notre domaine par Bodeur (1996).

Contact : V. Leonardi (UMR HSM), veronique.leonardi@univ-montp2.fr

▼► Bloc diagramme schématique représentant l'aquifère karstique du Lez (Hérault, France) (A) avec modélisation de la karstogenèse de cet aquifère : création de conduits karstiques pendant la phase messinienne entre la source du Lirou et la source du Lez (B page suivante).

D'après Leonardi, V., Massonnet G., Planteblat C., Gal C., 2016. Karst genesis modelling of a regional Mediterranean aquifer (Lez, France). Presented at the 43rd IAH Congress, 25-29th September, 2016, Montpellier, France.

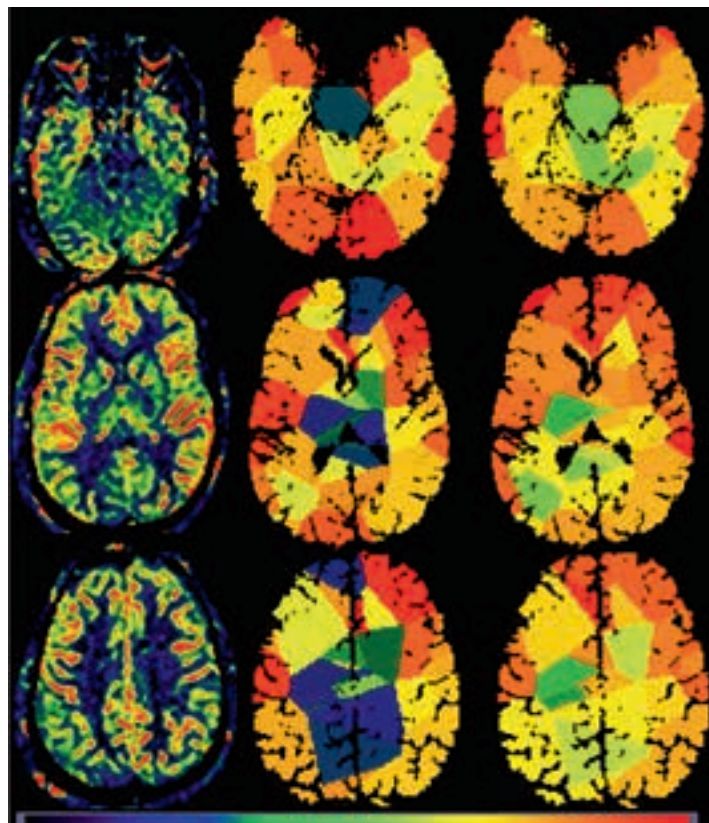


Élaboration d'un outil prédictif en planning préopératoire : nouvelle approche des cartes IRM de connectivité anatomo-fonctionnelle cérébrale

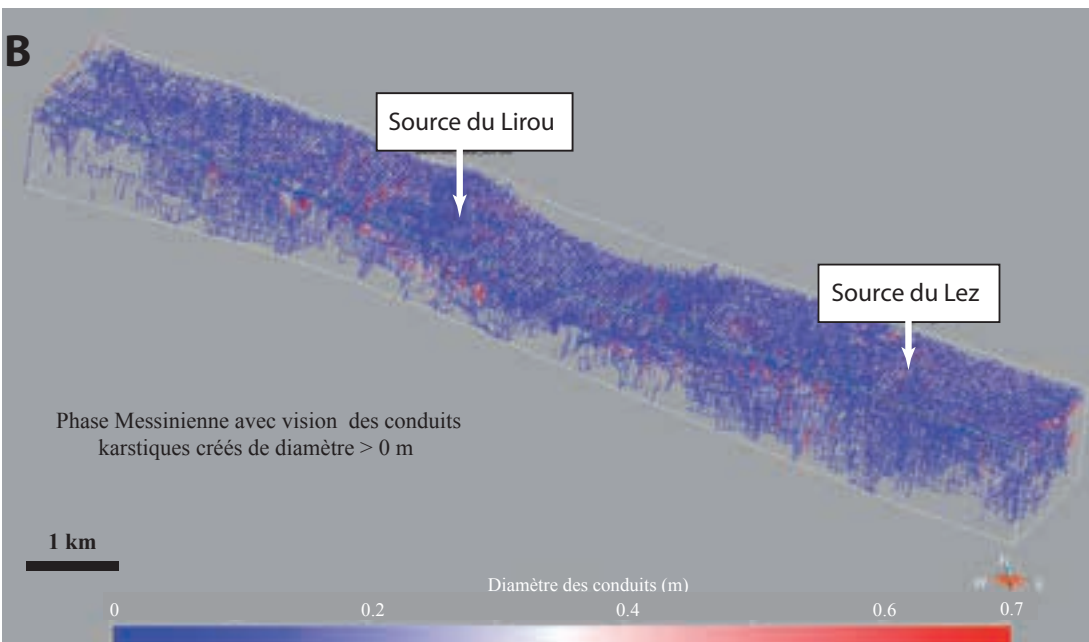
La recherche en imagerie du cerveau dans un contexte à la fois fondamental et clinique, poursuit deux objectifs majeurs. Le premier est d'améliorer notre capacité à fournir de nouveaux marqueurs diagnostiques pouvant se substituer à des examens invasifs, en particulier dans le contexte d'un acte chirurgical. Le second est de participer à l'élaboration de modélisations multi-échelles cohérentes du fonctionnement cérébral. Les interactions locales sont croissantes entre les Services de Neurochirurgie et de Neuroradiologie du Centre Hospitalier Régional Universitaire de Montpellier, les laboratoires d'informatique (UMR LIRMM) et de Physique (UMR L2C, Axe Physique Théorique) de l'Université de Montpellier (UM). Elles font émerger une collaboration allant du diagnostic neuroradiologique et de l'acte chirurgical jusqu'au développement de chaînes de traitement et de modèles originaux d'analyse des données issues de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle chez les patients. Enfin, la structuration hospitalo-universitaire de Montpellier permet la réunion de toutes ces compétences sur un même site et joue un rôle facilitateur dans cette interaction.

De nombreuses études cliniques ont déjà assis la réputation de la plateforme I2FH (Institut d'Imagerie Fonctionnelle Humaine) et des outils d'analyse qu'elle a développés. Du côté des neurosciences fondamentales, une première étape de modélisation originale a été franchie avec la mise au point d'un modèle individualisé global de la circulation intracrânienne, modèle basé sur la convergence de multiples modalités d'imagerie. La figure *ci-contre* montre la comparaison entre données de perfusion cérébrales mesurées et simulées à l'échelle du cerveau entier. Toujours de ce point de vue de modélisation, les étapes futures porteront sur l'application de modèles de type champ moyen aux données de l'imagerie cérébrale dans le but de construire de nouveaux outils d'analyse prenant en compte toute la richesse, pour l'instant sous exploitée, des données très riches issues de notre ancrage hospitalo-universitaire.

Contact : F. Molino (UMR L2C), francois.molino@umontpellier.fr



▲ **Perfusion cérébrale : valeurs brutes et rapportées aux différents territoires.** La première colonne illustre la carte de débit brute obtenue par marquage artériel, la deuxième colonne la valeur relative du débit estimée par le modèle pour chaque région, et la troisième la valeur moyenne sur la base des données.
© Équipe de recherche CONNECTOME/UMR L2C



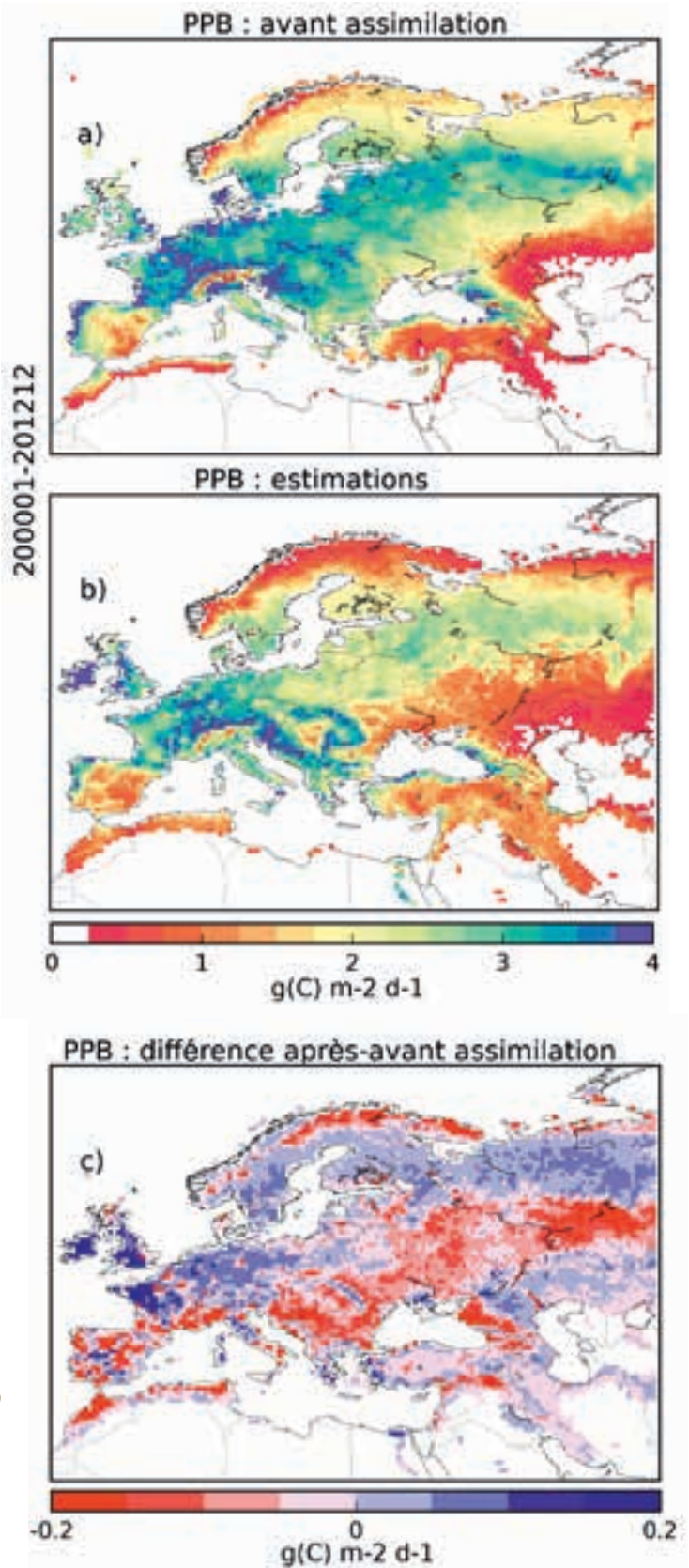
Assimilation de données télédéteectées pour le suivi de la végétation

Les simulations du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) indiquent que les sécheresses et les périodes de températures élevées seront de plus en plus fréquentes avec les changements climatiques. Observer et comprendre l'évolution des paramètres des surfaces continentales, comme la végétation ou l'état hydrique des sols, soumis à ces événements climatiques extrêmes est un enjeu scientifique majeur dans l'adaptation au changement climatique. Les observations issues de la télédétection spatiale ont l'avantage d'être disponibles à l'échelle mondiale et de manière répétée dans le temps. De nombreuses observations issues de la télédétection spatiale, en lien avec le cycle hydrologique et la végétation, sont déjà disponibles. Combiner la modélisation des surfaces terrestres à ces observations télédéteectées permet d'accéder à des paramètres non observés. L'assimilation de données est la méthode numérique qui permet d'intégrer ces importants volumes d'observations dans les modèles de surfaces continentales de manière cohérente avec leur représentation des processus.

Le CNRM a développé des systèmes d'assimilation de données adaptés aux surfaces continentales dans la plateforme de modélisation SURFEX*. Le but est de contraindre le modèle de surface ISBA (Interaction-Sol-Biosphère-Atmosphère) à partir d'observations satellitaires telles que l'humidité superficielle du sol et l'indice de surface foliaire. Ces systèmes d'assimilation séquentiels de données ont été mis en œuvre avec succès dans une chaîne de suivi des flux d'eau et de carbone à l'échelle mondiale. La figure ci-contre illustre l'impact de l'assimilation de ces données satellitaires sur la Production Primaire Brute de la végétation (PPB, quantité de carbone absorbée par la végétation par photosynthèse) en région Euro-Méditerranéenne (2000 et 2012). Des estimations journalières de PPB issues d'une spatialisation des observations des sites FLUXNET** sont utilisées pour l'évaluation. Après assimilation, on constate une meilleure représentation de la PPB par le modèle ISBA, c'est-à-dire des valeurs simulées plus proches des valeurs observées de FLUXNET.

Contacts : C. Albergel, clement.albergel@meteo.fr;
J.-C. Calvet, jean-christophe.calvet@meteo.fr (UMR CNRM)
Plus d'informations : www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1022

* Plateforme « Surface Externalisée », SURFEX : www.umr-cnrm.fr/spip.php?article145
** Spatialisation des données FLUXNET : www.bgc-jena.mpg.de/geodb/projects/Home.php



► **Valeurs moyennes de production primaire brute (PPB) entre 2000 et 2011.**

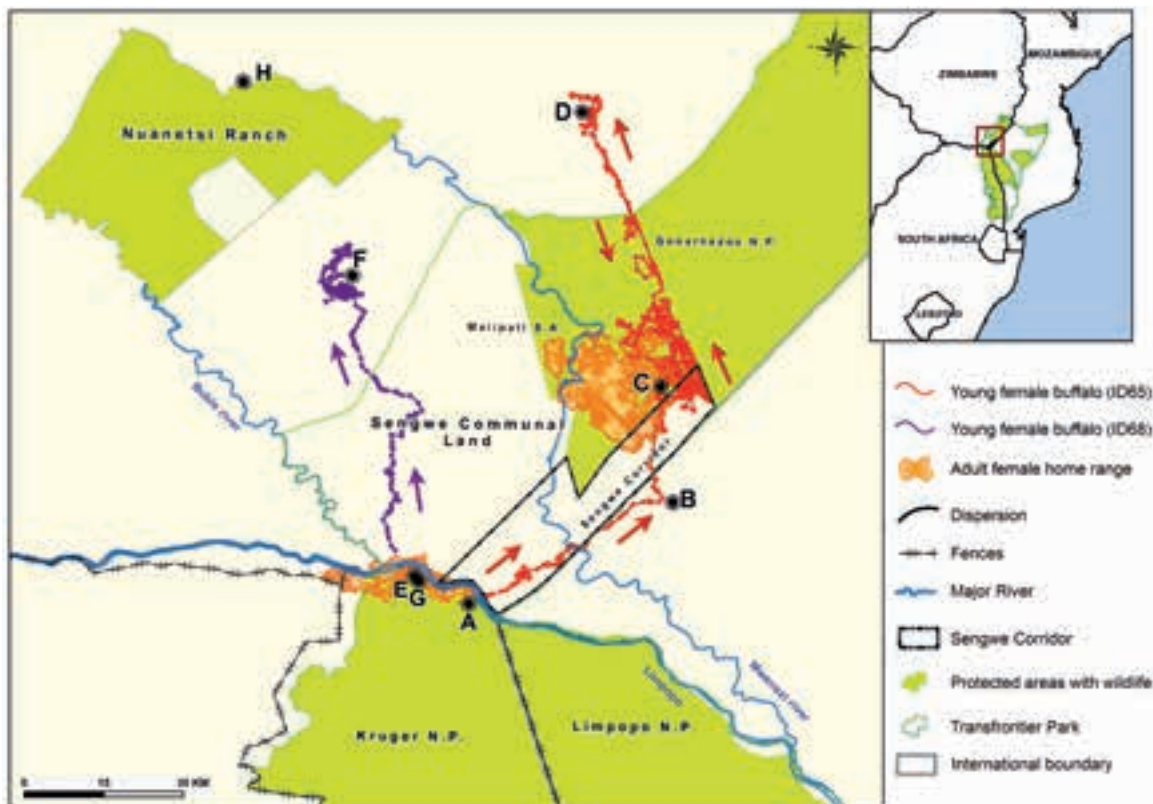
- (a) Simulées par le modèle ISBA avant assimilation.
(b) Valeurs obtenues par spatialisation des observations des sites FLUXNET.
(c) Différences entre les PPB représentées par le modèle ISBA après et avant assimilation d'observations satellitaires d'humidité superficielle du sol et d'indice de surface foliaire.

La télémétrie pour déterminer les comportements et les interactions entre ongulés sauvages et domestiques aux frontières des aires protégées

En Afrique australe, les frontières poreuses entre territoires, tels que les aires protégées et les zones communales, favorisent les interactions entre animaux sauvages et domestiques. Ces interactions et leurs déterminants sont importants à comprendre afin de mieux gérer les interfaces entre animaux sauvages/domestiques et les hommes. En effet, de telles interfaces cristallisent une partie des enjeux qui seront déterminants pour le succès des initiatives visant à faire coexister développement local et conservation de la biodiversité. Comment assurer l'accès aux pâturages et à l'eau pour le bétail et la faune sauvage sans compétition ? Comment limiter la transmission de maladies entre animaux et entre les animaux et les hommes ? Ou encore, comment limiter la prédation sur le bétail par les carnivores sauvages ?

Contacts : A. Caron, alexandre.caron@cirad.fr, D. Cornelis, daniel.cornelis@cirad.fr et M. de Garine-Wichatitsky, degarine@cirad.fr (UMR ASTRE)
Plus d'informations : www.rp-pcp.org

Dans de tels socio-écosystèmes, complexes par définition, l'utilisation de la télémétrie, notamment satellitaire (c.-à-d. l'utilisation de colliers permettant de géo-localiser l'animal équipé à chaque pas de temps prédéfini) permet de (i) décrire les comportements des espèces sauvages qui s'adaptent à ces interfaces ; (ii) comprendre les pratiques d'élevage et les discuter avec les éleveurs dans leur paysage du risque ; (iii) analyser les interactions entre animaux sauvages et domestiques et leurs principaux déterminants. L'ensemble des données spatiales collectées (mais aussi température de l'animal, vitesse, etc.) associées à des cartes de végétation, des enquêtes sur les pratiques d'élevage et des études épidémiologiques permettent de produire la connaissance qui peut informer les processus de décision puis de gestion. Cette connaissance est présentée, discutée et utilisée dans un processus participatif entre tous les acteurs (fermiers, gestionnaire de la faune, professionnel de la chasse etc.). In fine, l'objectif est d'intégrer ce type d'outil dans des scénarios de gestion locale pour promouvoir une gestion intégrée de ces interfaces.



▲ Exemple de données de télémétrie. Domaine vitaux des femelles buffles adultes dans le GLTFCA (surface orange) et trajets de jeunes femelles buffles (lignes rouge et violette) à travers les territoires et les pays : a-b-c-d) du Kruger vers le Mozambique puis vers le Zimbabwe pour la ligne rouge ; g-e-f) du parc du Kruger en Afrique du Sud vers les zones communales du Zimbabwe pour la ligne violette. Ce type de comportement chez les jeunes femelles buffles n'avait pas jusque-là été décrit. © Marie Gely, adapté de Caron et al. Emerging Infectious Diseases, 2016.



© Daniel Cornelis/Cirad

© Michel de Garine-Wichatitsky/Cirad

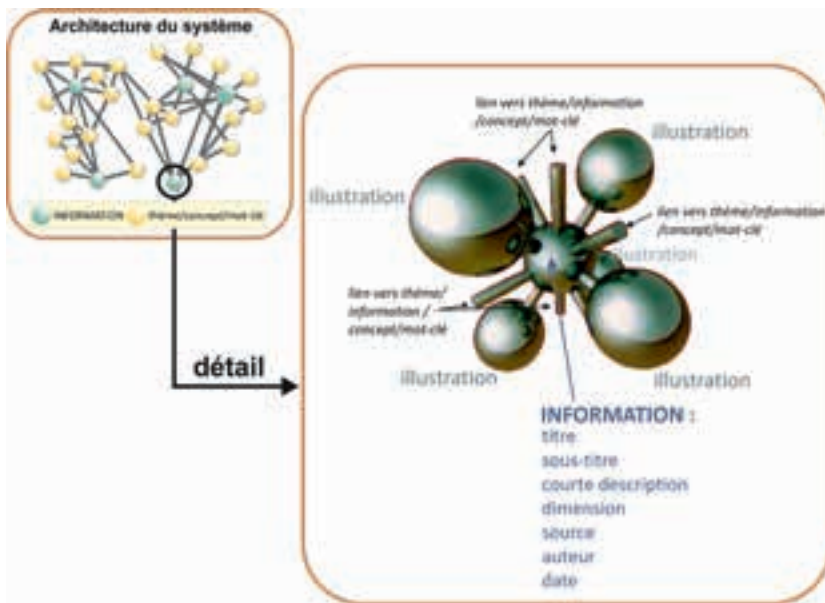
▲ Femelle adulte de buffle africain (gauche) et éleveur et sa vache (droite) vivant tous ensemble dans l'aire de conservation transfrontalière du Great Limpopo (GLTFCA). Les 2 bovidés sont équipés de colliers émetteurs qui enregistreront pendant 1 à 2 ans leurs données de géolocalisation.

Articulation au sein d'un ensemble formel de connaissances relatives à des problématiques multidisciplinaires

Dans un domaine de recherche donné, les expérimentations et les observations de terrain soulèvent de multiples questions pour les disciplines concernées. Les connaissances acquises par chacune constituent autant de contributions nécessaires à la compréhension du phénomène naturel observé. Dans le cas qui nous intéresse, on cherche une méthode pour articuler au sein d'un même ensemble formel ce tissu de connaissances en vue de produire une vision la plus intégrée possible du fonctionnement des communautés et populations de rongeurs et de leurs parasites dans différentes situations environnementales. Pour appréhender cette complexité, trois directions sont explorées : les questions, les connaissances, la modélisation : l'analyse sémantique d'interviews de chercheurs permet d'appréhender le domaine de

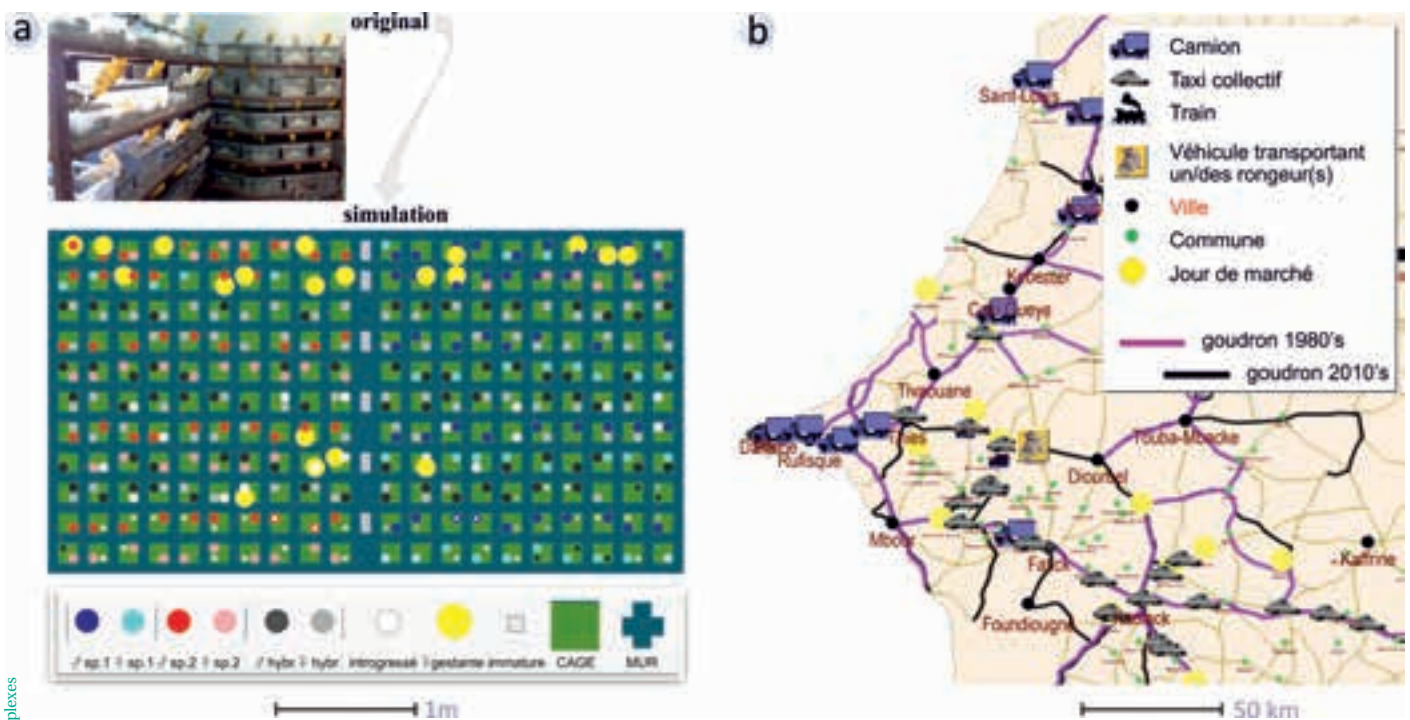
questionnement à représenter ; l'articulation d'informations unitaires au sein d'un réseau de mots-clés fournit une représentation structurée de la connaissance scientifique (fig. 1), enfin, un modèle multi-protocoles permet d'identifier les termes génériques essentiels à la production de dynamiques spatiales et temporelles. Cette dernière approche, fondée sur une modélisation informatique de type « système multi-agent », permet d'élaborer une architecture logicielle mettant en relation des recherches situées à différents niveaux, du gène à l'écosystème, dans ce domaine (fig. 2). Les trois approches combinées concourent à produire une typologie de la connaissance propice à l'organisation de projets pluridisciplinaires complexes.

Contact : J. Le Fur (UMR CBGP), lefur@ird.fr



◀ Figure 1. Structure d'un système de navigation dans un domaine de connaissances dédié à l'articulation de connaissances multidisciplinaires et multi-formats.

© J. Le Fur.
 (a) Des informations d'origines variées sont associées par des liens hypertexte à divers descripteurs (date, source, mot-clé...); l'utilisateur peut se déplacer d'un item à un autre en empruntant les chemins thématiques tissés par chaque information. Le réseau se construit petit à petit avec l'ajout de nouvelles informations.
 (b) Détail de la structure interne d'un item d'information : l'application du système à des domaines pluridisciplinaires variés permet d'aboutir à une structure parcimonieuse pour la définition d'une information scientifique compatible entre disciplines.
 Plus d'informations : <http://centreinfo.science>



▲ Figure 2. Deux exemples contrastés de simulations réalisées avec la même plateforme.

(a) Expérimentation en animalerie d'hybridation d'espèces jumelles de rongeurs africains.
 (b) Simulation de la dynamique de déplacement/colonisation des rongeurs commensaux au Sénégal. L'articulation entre disciplines permet de construire une grande variété de modèles de simulation à des échelles spatiales et temporelles distinctes. Chaque protocole ou étude de cas représenté enrichit continuellement les approches précédentes et en bénéficie.
 D'après Le Fur et al., 2017. A Simulation Model for Integrating Multidisciplinary Knowledge in Natural Sciences. Heuristic and Application to Wild Rodent Studies. Proc. 7th Internat. Conf. Simul. and Model. Method., Technol. and Applic. (Simultech), Madrid, July 2017: 340-347. www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006441803400347

Conceptualiser un problème agronomique en système : bases méthodologiques et illustration sur la vigne

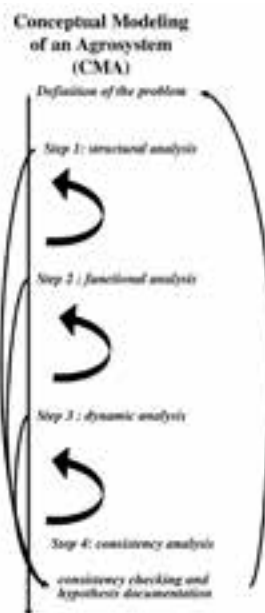
La résolution de questions agronomiques, associée à la conception de systèmes de culture, requiert l'intégration de connaissances provenant de diverses disciplines. Pour être à la fois scientifiquement fondée et opérationnelle pour interagir avec des acteurs (agriculteurs, conseillers...), cette intégration doit se faire dans un cadre systémique qui explicite les relations entre le système technique, l'environnement, les processus biophysiques et les performances et services de l'agrosystème. Le protocole de conceptualisation d'un problème en système développé par l'UMR SYSTEM permet de formaliser un agrosystème considéré avec ses limites, sa structure, ses processus biophysiques de base et les autres systèmes en interaction. Il permet d'intégrer des connaissances scientifiques de disciplines variées mais aussi des connaissances expertes dans un cadre partagé : le modèle conceptuel d'un agrosystème (CmA). Le CmA est un ensemble structuré de connaissances et d'hypothèses interrogeable via l'extraction de graphes. Un exemple, traité en collaboration avec l'Institut Français de la Vigne et du Vin, est l'élaboration d'hypothèses pour expliquer le dépérissement de ceps de vigne du cépage Syrah. En intégrant les connaissances d'experts notamment de physiologie végétale, de pathologie végétale et de conduite du vignoble, le CmA a permis de synthétiser plus de vingt ans de recherches fragmentées sur ce syndrome complexe et de les transcrire en hypothèses mises ensuite en expérimentations conduites et interprétées à l'aide de ce modèle. Cette démarche de conceptualisation, qui donne un cadre formalisé à l'agronomie systémique, est utilisée dans de nombreux projets de recherche, comme la formalisation d'indicateurs en vue d'accompagner la transition d'un agrosystème*, la conception de systèmes techniques innovants** ou l'élaboration de modèles numériques explicitant les liens paramètres-processus. Elle est aussi utilisée comme support des enseignements en agronomie systémique et en agroécologie portés par l'UMR SYSTEM à Montpellier SupAgro.



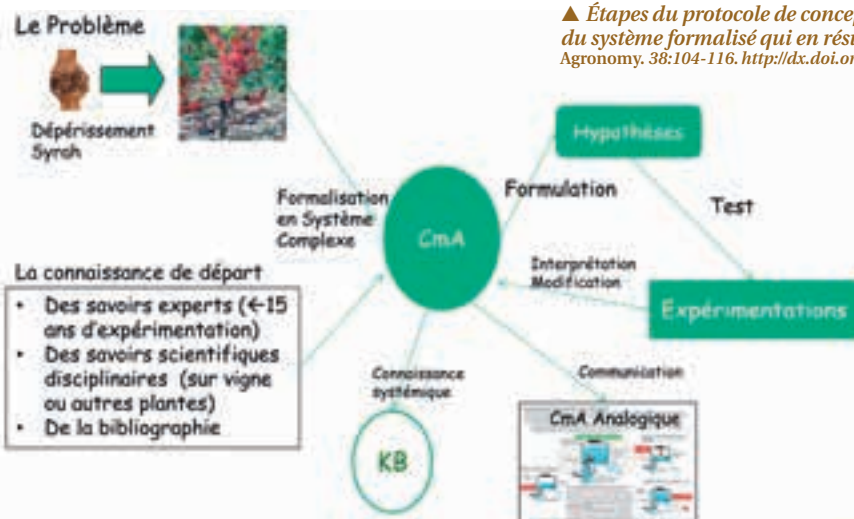
© UMR SYSTEM

Contact : R. Métral (UMR SYSTEM),
raphael.metral@supagro.fr

* Projet Aidy (Analyse intégrée de la dynamique de conversion à la viticulture AB) : www6.inra.fr/viticulture-bio
** Projet EcoViti : www.vignevin.com/recherche/vigne-et-terroir/ecoviti.html



▲ Étapes du protocole de conceptualisation d'un agrosystème et principaux éléments du système formalisé qui en résultent. D'après Lamanda N. et al., 2012. European Journal of Agronomy. 38:104-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.004>



© UMR SYSTEM

▲ **Conceptualisation d'un agrosystème pour synthétiser des savoirs et définir un programme d'expérimentation sur un système complexe.** La formalisation de connaissances interdisciplinaires concernant le problème de dépérissement de la Syrah a permis la création d'un modèle conceptuel (CmA) qui a été mobilisé pour définir un programme d'expérimentations. © J. Wery

Modélisation qualitative du fonctionnement d'assemblages microbiens

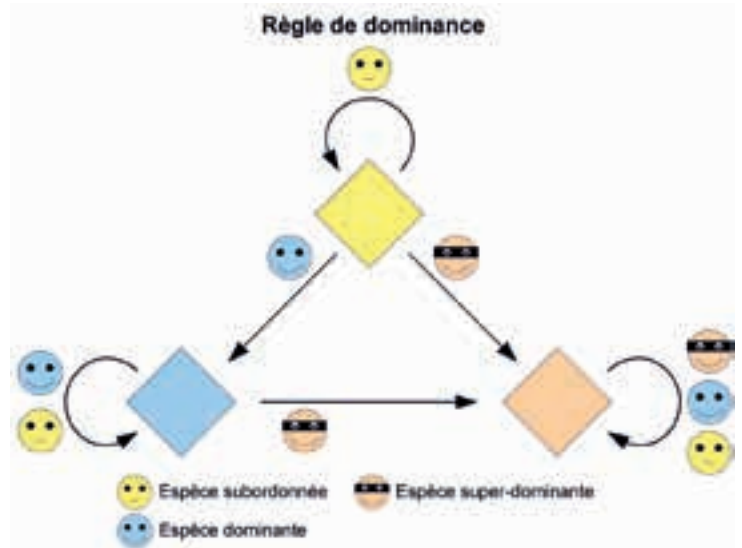
L'observation des assemblages microbiens met en évidence des interactions entre les entités qui les constituent (individus ou espèces) dès lors qu'on peut comparer les performances des assemblages à celles des entités isolées. La compréhension de ces interactions est un enjeu majeur en écologie microbienne car elle permettrait de prédire les performances des assemblages microbiens (production de biogaz par exemple). La plupart des modèles considèrent des interactions deux à deux (proie/prédateur, ressource/consommateur) alors que l'expérience montre des interactions entre plus de deux acteurs (facilitation, inhibition). Mais la formalisation et l'étude de modèles qui prennent en compte des interactions plus complexes se heurtent à l'explosion combinatoire du nombre de possibilités (avec 100 entités, on dénombre environ 5 000 interactions possibles 2 à 2, et près de 4 millions 4 à 4). En pratique, on ne peut donc observer qu'un nombre limité d'assemblages possibles.

Les UMR Eco&Sols et MISTEA ont proposé une nouvelle approche de modélisation qualitative pour appréhender cette complexité*. Cette approche repose sur une classification des entités et des assemblages d'entités, les classes d'assemblages étant déterminées par des règles d'interaction entre les classes d'entités. Cette approche a, par exemple, permis de décrire le comportement d'assemblages microbiens de différentes tailles constitués à partir de 7 souches isolées. Les assemblages de 3 souches étaient en moyenne plus performants que les souches isolées et que les assemblages de 7 souches. Ainsi, le comportement observé est bien décrit par 3 classes de souches qui interagiraient selon

* Travaux effectués dans le cadre d'un projet de recherche soutenu par le Réseau National des Systèmes Complexes.

une règle de dominance, interaction classique en écologie. En effet, la probabilité d'obtenir une certaine classe d'assemblage passe par un maximum pour une taille d'assemblage de 3 souches.

Contacts : B. Jaillard (UMR Eco&Sols), benoit.jaillard@inra.fr, J. Harmand (UPR LBE), jerome.harmand@inra.fr, A. Rapaport (UMR MISTEA), alain.rapaport@inra.fr



▲ La présence d'une espèce dominante, voire super-dominante, dans un assemblage implique que cet assemblage performe selon un mode dominant, voire super-dominant. D'après Jaillard et al., 2014. *Functional Ecology*, 28: 1523-1533.

Modélisation de connaissances : ontologies spatio-temporelles (paysage, biodiversité, images)

L'analyse de systèmes complexes à diverses échelles spatiales et temporelles à partir de données issues d'observations diverses, constitue un des enjeux importants pour plusieurs domaines scientifiques. Deux éléments essentiels interviennent dans ces analyses : la connaissance des divers experts scientifiques et les données observées. En ce qui concerne le premier élément, sous l'impulsion de l'ingénierie des connaissances, la formalisation explicite de celles-ci sous forme d'ontologies constitue une avancée en termes de partage et de capitalisation. Pour le second, l'imagerie satellitaire permet, grâce au passage d'une échelle locale à une échelle plus globale, d'appréhender de vastes espaces en réduisant les observations terrain. Divers projets nous ont permis d'explicitier comment la connaissance formalisée au sein d'ontologies permet la mise en œuvre de solutions novatrices dans l'analyse des images satellitaires, en réduisant le fossé sémantique*, à savoir :

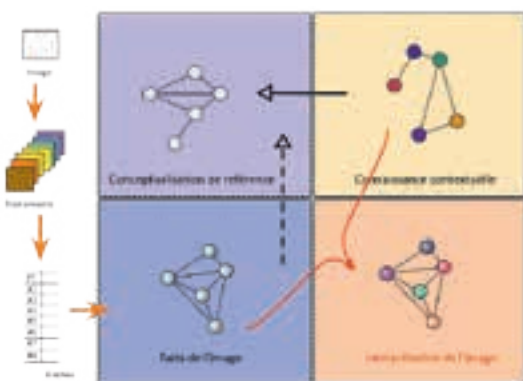
- L'utilisation d'ontologies pour l'interprétation automatisable d'images

satellitaires quel que soit le paradigme d'analyse (pixel ou objet). L'interprétation est le fruit du raisonnement effectué à partir de la connaissance contextuelle (construite à partir de la connaissance experte) sur des objets d'images préalablement extraits par traitements (cf. fig. 1 ci-dessous).

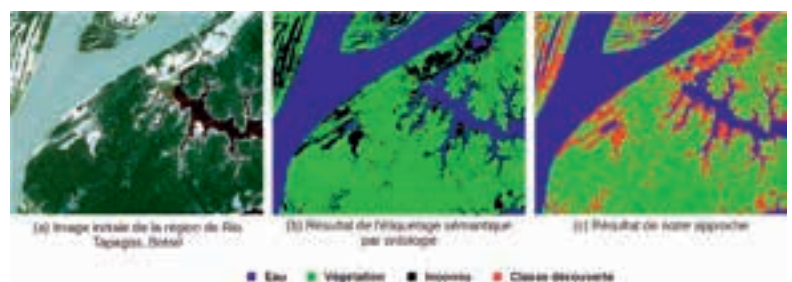
- L'exploitation conjointe d'un raisonnement à base d'ontologies et de la classification non supervisée de pixels. Le raisonnement permet l'étiquetage sémantique des pixels à partir de connaissances issues du domaine concerné. Les labels générés guident ensuite la tâche de classification qui permet de découvrir de nouvelles classes tout en enrichissant l'étiquetage initial. La figure 2 montre un exemple applicatif.

Contacts : I. Mougnot, isabelle.mougnot@umontpellier.fr; T. Libourel, therese.libourel@umontpellier.fr; S. Andres, samuel.andres@yahoo.fr et H. Chahdi, hatim.chahdi@yahoo.com (UMR ESPACE-DEV)

* Une image est décrite à un niveau numérique alors que l'utilisateur est intéressé par son contenu sémantique. Trouver des correspondances entre niveaux numérique et sémantique est l'enjeu de la résolution de ce que l'on dénomme « fossé sémantique ».



▲ Figure 1. Vision d'ensemble du principe d'interprétation sémantique. D'après Andrés S., 2013. *Ontologies dans les images satellitaires : interprétation sémantique des images*. Thèse de doctorat en Informatique, UM.



▲ Figure 2. Application de l'approche sur une image de la région d'Amazonie, Brésil. D'après Chahdi H., 2017. *Apports des ontologies à l'analyse exploratoire des images satellitaires*. Thèse de doctorat en Informatique, UM.

Mise à disposition : accessibilité et interopérabilité des données

Le système d'information de l'OSU OREME

Pour étudier des systèmes complexes, les scientifiques doivent être en mesure de croiser des données fortement hétérogènes — car provenant de diverses communautés ayant chacune leurs propres langages et objets d'intérêt — et dont ils n'ont pas nécessairement connaissance *a priori*. La plateforme « Système d'Information » de l'OSU OREME s'efforce de relever ce défi. Elle propose ainsi aux équipes scientifiques rattachées à l'Observatoire des services de structuration, normalisation, visualisation et croisement des données sur les dimensions spatiale, temporelle et sémantique. Afin de permettre la comparaison des différents objets d'étude, la première étape consiste à décrire les jeux de données à l'aide de métadonnées. En veillant à utiliser des vocabulaires contrôlés et des formats de description interopérables, la plateforme permet d'identifier

des similarités avec des jeux de données non connus initialement et présentant un lien scientifique avec le système complexe étudié. La deuxième étape consiste à s'affranchir de l'hétérogénéité des formats des données collectés. La plateforme s'appuie pour cela sur des outils de structuration et diffusion interopérables comme les bases de données relationnelles ou les serveurs cartographiques standardisés.

Pour permettre la compréhension mutuelle des différents objets d'étude, exprimés dans des langages et domaines de valeurs variés, la plateforme normalise les données sous-jacentes dans des référentiels communs (hydrographiques, taxonomiques, unités de mesure, etc.). Ainsi est obtenue l'interopérabilité sémantique des différentes sources de données.

De plus, en s'appuyant sur les relations entre entités définies dans ces référentiels (par ex. classification taxonomique), le système permet d'agréger les données sur des niveaux d'échelle variés (par ex. espèce, famille...) et facilite ainsi leur comparaison. Finalement, en s'adossant sur les standards de diffusion de données (comme les standards de l'*Open Geospatial Consortium*), la plateforme met en œuvre le croisement spatial et temporel des données grâce à des outils de visualisation interactifs et dynamiques : portail cartographique, outil de visualisation de séries temporelles, etc.

Contact : E. Servat, eric.servat@umontpellier.fr
Plus d'informations : <https://data.oreme.org>

◀ *Le portail cartographique de l'OREME permet la visualisation et l'interrogation de données issues de différents serveurs cartographiques.*



L'OSU OREME et ses missions

Reconnu par l'Institut National des Sciences de l'Univers en 2007 et par le Conseil d'administration de l'UM en 2009, l'Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) OREME (Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement) est une école interne de l'UM. Il comprend huit UMR et couvre les champs des sciences de l'univers, de l'écologie et de la biodiversité. L'observatoire met l'accent sur l'étude des changements environnementaux et anthropiques ainsi que sur leurs impacts, particulièrement sur les aléas et la vulnérabilité des milieux méditerranéens. Outre sa mission pédagogique, l'OREME mobilise des moyens d'observation lourds et pérennes et des compétences scientifiques et techniques reconnues sur des aspects très divers de l'environnement physique, chimique et biologique méditerranéen. L'Observatoire recourt à ses 17 services d'observation (SO) (dont plusieurs labélisés au niveau national) et ses plateformes mutualisées — Système d'information (cf. ci-dessus), plateforme de géochimie AETE-ISO, plateforme MEDIMEER pour les expérimentations marines à l'aide de mésocosmes — pour atteindre ses objectifs. L'OREME tisse des liens entre communautés scientifiques — écologie, biodiversité, sciences de l'univers — afin qu'elles travaillent ensemble sur les signaux collectés par les SO à différentes



échelles de temps et d'espace. L'un des principaux challenges de l'OREME réside dans sa capacité à récolter, intégrer et partager les données hétérogènes associées à ces disciplines afin de contribuer à mettre en évidence des corrélations complexes. À la clé de cette mise en relation des données, la découverte de signaux systématiques permettant de juger de l'effet du changement global et/ou anthropique et d'en comprendre les mécanismes dans ses effets environnementaux. À ce titre, les missions de l'OREME sont de :

- soutenir l'activité d'observation systématique ;
- soutenir la construction de bases de données environnementales ouvertes, partagées et référencées au niveau international ;
- encourager la mutualisation des moyens analytiques (observation, expérimentation, modélisation) ;
- constituer le relais local des réseaux nationaux d'observations et d'être un acteur important des actions tournées vers la Méditerranée.

Contact : E. Servat, eric.servat@umontpellier.fr
Plus d'informations : <https://oreme.org>

Stockage intelligent, entre entrepôts et lacs de données

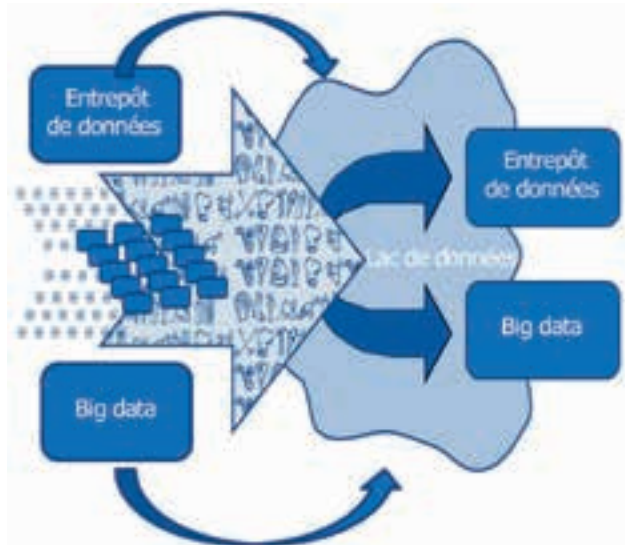
Le stockage des données impacte la façon dont elles seront exploitées pour en extraire informations et connaissances nouvelles. Il existe plusieurs formes de stockage, toutes ayant des avantages et des inconvénients, que ce soit au moment du dépôt des données ou de leur exploitation. Les entrepôts de données ont émergé dans les années 1990 pour disposer de lieux de stockage dédiés spécifiquement pour répondre à des indicateurs préétablis et pour lesquels il s'agit alors de constituer une structure décisionnelle orientée. Les lacs de données émergent depuis quelques années comme une architecture nouvelle permettant de répondre aux enjeux de gestion de données massives. Souvent comparés aux entrepôts de données, ils permettent de stocker des masses de données afin de les transformer en informations. Mais quelles sont les différences entre les deux ?

Les lacs de données sont associés, plus que les entrepôts, à des sources hétérogènes de données non transformées. On parle alors de processus ELT (*Extract, Load, Transform*) et non ETL, la transformation étant opérée plus tard. Ainsi, l'utilisateur d'un lac de données est différent de celui d'un entrepôt et sera plutôt un informaticien capable d'utiliser des outils techniques de manipulation et d'analyse de masses de données. Les lacs de données permettent, à l'inverse des entrepôts, de stocker des données sans connaître à priori les indicateurs et questions auxquels ils permettront de répondre. Dans les deux cas, un enjeu important réside dans la gestion des métadonnées. Bien qu'il n'existe toujours pas de définition consensuelle, un lac de données peut être défini comme une collection de données :

- non transformées ;
- de formats non contraints (tous formats acceptés) ;

- conceptuellement rassemblées en un endroit unique mais potentiellement non matérialisées ;
- destinées à un utilisateur expert en science de données ;
- munies d'un catalogue de métadonnées et d'un ensemble de règles et méthodes de gouvernance de données.

Contacts : A. Laurent, laurent@lirmm.fr, C. Madera, cedrinemadera@gmail.com (UMR LIRMM)



▲ Architecture d'un système d'information intégrant un lac de données.
© Cédrine Madera

Mise en correspondance de données massives et hétérogènes

Pour traiter les données imposantes aujourd'hui disponibles (le terme d'infobésité est utilisé), la problématique de recherche du *Big Data* est classiquement mise en avant avec les « 3 V » qui la caractérisent : volume, variété et vélocité. Le traitement des données hétérogènes se concentre sur le critère « variété ». Ici, nous nous intéressons plus particulièrement à la mise en correspondance de données de nature très hétérogènes syntaxiquement et sémantiquement. Concrètement, pour les chercheurs, une telle démarche peut se révéler cruciale pour mettre en relation des connaissances issues de sources différentes (par exemple, données d'enquêtes vs. publications scientifiques, documents du web vs. images satellitaires). Un tel traitement des données, dans leur globalité, peut avoir plusieurs vertus comme la découverte de connaissances nouvelles, l'intégration de données, la mise en relation de chercheurs, etc.

La question de recherche posée peut être formulée comme suit : comment mettre en relation les informations thématiques, temporelles et spatiales issues de données diverses afin de disposer d'un cadre de référence commun ? Fort de l'expérience en

exploration de données hétérogènes sur des applications concernant la sécurité alimentaire, la veille en épidémiologie animale, le suivi des cultures, l'UMR TETIS mène une réflexion globale sur la définition de l'hétérogénéité et l'interopérabilité selon trois axes : (1) mise en relation thématique, (2) mise en relation spatiale, (3) mise en relation temporelle. L'identification de descripteurs pertinents propres à ces trois axes est établie par des méthodes symboliques, statistiques et sémantiques et l'utilisation de méthodes de TALN (traitement automatique du langage naturel) pour explorer les données textuelles. Des représentations spécifiques sont également mises en œuvre afin de répondre aux critères d'exigences des applications réalisées.

Contacts : J. Fize, jacques.fize@cirad.fr, M. Roche, mathieu.roche@cirad.fr et M. Teisseire, maguelonne.teisseire@irstea.fr (UMR TETIS)

Plus d'informations :
<http://textmining.biz/Projects/Songes>
www.cirad.fr/nos-recherches/resultats-de-recherche/2016/veille-sanitaire-sur-le-web-un-outil-pour-prevenir-la-propagation-des-maladies-animales



► Mise en correspondance de données hétérogènes.

GEOSUD, un grand équipement pour démocratiser l'accès à l'imagerie satellitaire

Les images satellites constituent des données précieuses pour la recherche et l'action publique quand il s'agit d'étudier et de gérer des systèmes complexes dans les domaines de l'agriculture, de l'environnement et du développement territorial. Pourtant, l'imagerie satellitaire peine à se développer, principalement pour des questions de prix et de complexité dans son utilisation. Baisser les coûts et offrir des services adaptés aux différents types d'utilisateurs, c'est tout l'enjeu du projet GEOSUD*. Basé sur une stratégie de mutualisation, GEOSUD met à disposition via un portail internet une base d'images satellitaires à très haute résolution spatiale (de 50 cm à 5 m) en licence pour tout acteur public français et pour des usages non commerciaux. L'archive GEOSUD comprend des couvertures homogènes et annuelles du territoire national depuis 2010 ainsi que des images sur des zones d'intérêt. Grâce à une station de réception satellitaire installée en 2014 à Montpellier, les utilisateurs peuvent demander des images SPOT 6-7 sur le monde entier. En partenariat avec le Centre national d'études spatiales et l'Institut national de l'information géographique et forestière, un nouveau dispositif, Dinamis, prolongera, dès 2018 et jusqu'en 2025, l'accès « gratuit » à l'imagerie satellitaire en l'étendant à un bouquet d'images complémentaires. GEOSUD a mis à disposition fin 2017 des services web de traitement d'images, exécutés à distance sur des



clusters installés au CINES (cf. ci-dessous). La communauté scientifique pourra les utiliser pour développer et diffuser de nouvelles chaînes de traitement et des produits dérivés des images, (par ex. des cartes de paramètres biogéographiques : biomasse forestière, humidité des sols, paysages agricoles, habitats naturels...). GEOSUD regroupe 480 structures adhérentes et plus de 700 comptes utilisateurs qui bénéficient de l'accès aux images, à des supports de formation et à une expertise d'appui. Depuis 2012, GEOSUD constitue un des piliers du pôle thématique Theia qui fédère la communauté nationale en télédétection appliquée aux surfaces continentales.

Contact : P. Maurel, pierre.maurel@irstea.fr
Plus d'informations : <http://ids.equipe-geosud.fr>

* Financements Contrat de plan État-Région/Fonds européen de développement régional (CPER/FEDER) et Programme d'Investissements d'Avenir (PIA) au titre des équipements d'excellence.

Le Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur (CINES)

Le CINES est un établissement public administratif national basé à Montpellier et placé sous la tutelle du ministère en charge de la recherche. Il propose des moyens informatiques exceptionnels à l'ensemble de la communauté scientifique dans ses missions statutaires stratégiques nationales :

- le calcul numérique intensif pour la simulation de grands défis scientifiques ;
- l'archivage pérenne de données électroniques pour la préservation du patrimoine scientifique ;
- l'hébergement de plateformes informatiques nationales dans le cadre de la mutualisation des moyens nationaux.

Ces missions sont adossées à des infrastructures hautement sécurisées de niveau Tier3+ (notamment deux alimentations électriques générales) et une soixantaine d'agents, ingénieurs et techniciens experts qui assurent l'exploitation et l'utilisation optimale des ressources ainsi que la formation, l'assistance et le support aux utilisateurs. Le CINES opère des équipements de pointe dont le supercalculateur OCCIGEN, acquis par GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif), qui figure parmi les plus puissantes machines européennes. Avec une capacité de 3,5 Petaflops* et 5 Petaoctets d'espace de stockage associé, cette machine permet 752 millions d'heures de calcul par an pour des simulations extrêmes. L'archivage pérenne (agrégé par le service interministériel des Archives de France) permet la conservation à très long terme de l'information numérique, en s'affranchissant de l'obsolescence des supports physiques et de l'évolution constante des formats et standards logiciels. Le service d'archivage permet d'adresser tout type de données numériques : scientifiques (issues d'observations ou de calculs), patrimoniales (revues, manuscrits, données pédagogiques...) ou administratives. Le CINES est le centre officiel d'archivage des thèses électroniques. Il est labellisé « data-center national » pour l'Enseignement et la Recherche par le comité « Infrastructures numériques » dans le cadre du Comité d'orientation du numérique. L'hébergement de

Contacts : O. Rouchon (calculs), rouchon@cines.fr,
M. Massol (archivage), massol@cines.fr
Plus d'informations : www.cines.fr



matériels informatiques permet de tirer profit des infrastructures exceptionnelles du centre pour accueillir en toute sécurité et à moindre coût des environnements stratégiques (calculateurs d'Irstea, de l'UM, etc.).

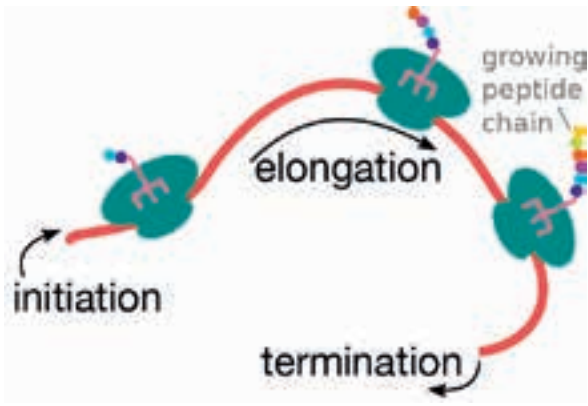
* 3,5 millions de milliards d'opérations par seconde.



© CINES



▲ Machine de calcul (OCCIGEN). © CINES



Compréhension et analyse des systèmes complexes

Un système complexe est constitué de nombreuses entités (individus ou autres) dont les interactions produisent un comportement global qui ne peut être facilement expliqué à partir des seules propriétés individuelles des constituants : on parle d'émergence. Les interactions des individus entre eux se superposent aux comportements individuels. Dans un réseau social par exemple, un individu peut agir sur un groupe dont il fait partie et dont il subit l'influence : on parle alors de rétroaction sur le système. Il s'agit donc de comprendre des phénomènes temporels et multi-niveaux. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de ce dossier, l'enjeu est de collecter les données, avec des capacités adaptées de stockage et de calcul, permettant de renseigner ces différents niveaux du système. Mais cela ne suffit pas car les phénomènes de rétroactions, ou encore les influences stochastiques de l'environnement sur le système, entraînent des comportements globaux avec des phénomènes de cascades et des bifurcations dans l'évolution du système induisant de brusques changements qualitatifs que nous avons du mal à analyser, à comprendre et à prédire avec les outils classiques. Il est donc nécessaire de disposer d'outils spécifiques qui permettent d'utiliser au mieux les données pour révéler les différentes dynamiques des systèmes complexes sous-jacents.

Les exemples de recherche présentés dans ce chapitre donnent un éclairage sur la diversité des niveaux abordés et des méthodes développées dans le domaine de l'écologie et de l'environnement. Si les démarches méthodologiques sont la plupart du temps multi-échelles, les questions sont le plus souvent posées à un niveau donné. Les exemples ont donc été rassemblés selon que les dynamiques abordées se situent plutôt au niveau intracellulaire, intra-organisme, des populations, des écosystèmes, ou encore de la gestion des territoires en incluant les dynamiques humaines et sociales.

Ainsi la première partie aborde la dynamique des organismes, depuis les dynamiques intracellulaires à la genèse des plantes en passant par les dynamiques multicellulaires (tumeurs) et les mécanismes d'expression phénotypiques. Pour les aborder, on trouvera la présentation d'outils d'analyse de réseaux, stochastiques ou non, utilisés pour la modélisation des réseaux de gènes ou le développement d'une invasion tumorale, des couplages de modèles à équations aux dérivées partielles ou, plus généralement, d'outils de la physique statistique. Ces modèles de simulation peuvent être utiles pour prédire l'efficacité de thérapies actuelles ou futures. Différents modèles de croissance des plantes sont présentés, souvent basés sur des plateformes de simulation numérique qui présentent une alternative aux approches strictement mathématiques.

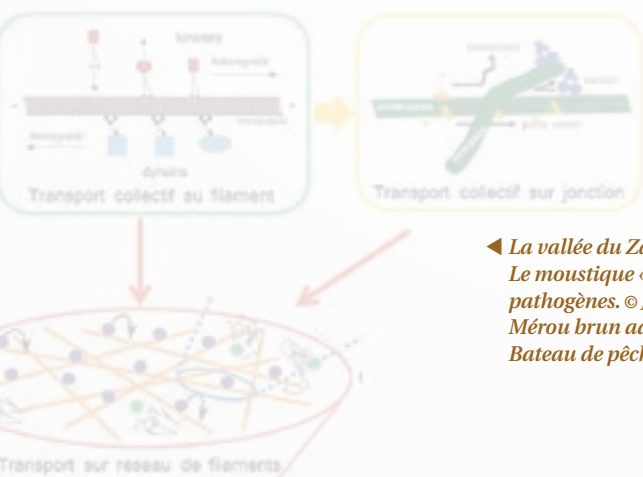
Une deuxième partie s'intéresse à la dynamique des populations, des bactéries aux humains en passant par les insectes, les poissons et les ruminants. Les modélisations paysagères multi-échelles, incluant ou non les relations populations/environnement, sont aussi utilisées pour analyser le comportement de populations (insectes, campagnols...) ou les dynamiques de colonisation ou d'extinction d'espèces végétales (zostères de l'étang de Thau). Ces modélisations prennent la forme de plateformes multi-agents (analyse de petits rongeurs d'Afrique et de leurs parasites) ou de modèles hybrides stochastiques/déterministes (biofilms dans les systèmes d'épuration des eaux). Plusieurs modèles d'épidémies (avec effet de seuil) sont présentés concernant la transmission de maladies épizootiques en Afrique : moustique au Vietnam, moustique tigre dans le sud de la France ainsi que le rôle des hommes et de leurs transports. Les travaux des anthropobiologistes évaluent l'impact des environnements sur le patrimoine biologique des individus et des populations.

Les exemples de modélisation des écosystèmes (3^e partie) vont de la modélisation des feux de savane africaine à celle des agrosystèmes au Maroc, en Zambie, en Guyane ou au Chili, en passant par la biophysique des surfaces continentales et les interactions entre les cycles de l'eau, du carbone et de l'énergie. Des méthodes d'assimilation de données hétérogènes sont travaillées et nécessitent souvent des moyens importants de calculs. La résilience des écosystèmes face aux perturbations environnementales ou humaines ainsi que notre capacité à anticiper des phénomènes de transition constituent une préoccupation majeure de nombreuses études.

Enfin, les modèles de gestion des territoires, présentés dans la 4^e partie, sont centrés sur les jeux d'acteurs : impact des routes et de nouvelles pollutions au Brésil, évaluation de la réduction des pesticides sur la production des vignes, impact des échanges de semences sur l'agro-biodiversité au Chili. Plusieurs modèles d'épidémiologie présentés sont appliqués à la maladie de Chagas Brésil, au paludisme en Guyane, ou au Chikungunya en Indonésie. Quelques recherches abordent la question de la multiplicité des territoires dans la gestion des forêts primaires à Madagascar.

Plusieurs centres de données et calculs ou de plateformes d'expérimentation de très haut niveau existent en Occitanie et sont présentées dans des encarts spéciaux. Ils constituent des dispositifs essentiels au traitement des systèmes complexes.

Bertrand Jouve (XSYS) et Jean-Pierre Müller (UPR Green)



◀ *La vallée du Zambèze (Zimbabwe). © L. Guerrini/Cirad*
Le moustique « tigre » Aedes albopictus, vecteur d'agents pathogènes. © J.B. Ferret/EID-Méditerranée
Mérou brun adulte. © Camille Albouy
Bateau de pêche. © Ifremer

Compréhension et analyse des systèmes complexes

Les structures de recherche développant des activités sur une (ou plusieurs) thématique(s) de ce chapitre sont consignées dans le tableau ci-dessous. La couleur vert foncé ■ indique une thématique dans

laquelle une équipe développe principalement ses activités, le vert clair ■ une thématique dans laquelle elle est également impliquée. L'emplacement d'un article est signalé par un numéro de page.

- 2.1. Dynamique des organismes
- 2.2. Dynamique des populations
- 2.3. Dynamique des écosystèmes
- 2.4. Gestion des territoires

Structures de recherche** - Compréhension et analyse des systèmes complexes	2.1	2.2	2.3	2.4
AGAP • Amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales	p. 27/30			
AGIR • Agroécologie - Innovations - Territoires				p. 49
Agro • Agronomie et développement durable				
AMAP • botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations	p. 31	p. 37/38	p. 41	
AMIS • Laboratoire d'anthropologie moléculaire et imagerie de synthèse		p. 38		
ASTRE • Animal, Santé, Territoires, Risques & Écosystèmes		p. 39		
B&PMP • Biochimie et physiologie moléculaire des plantes	p. 29			
CALMIP • Calculateur en Midi-Pyrénées				p. 53
CBGP • Centre de Biologie pour la Gestion des Populations		p. 37		
CEE-M • Centre d'Économie de l'Environnement de Montpellier				p. 52
CEFE • Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive		p. 34/36	p. 42/44	p. 47
CeMEB • Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité				
CERFACS • Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique			p. 43	
CESBIO • Centre d'Études Spatiales de la Biosphère			p. 44	
CNRM • Centre National de Recherches Météorologiques				
DIMNP • Dynamique des Interactions Membranaires Normales et Pathologiques	p. 25/26/28			
DYNAFOR • Dynamiques et écologie des paysages agriforestiers				
Eco&Sols • Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols & agro-écosystèmes				
ESPACE-DEV • Espace pour le développement		p. 35		
G-EAU • Gestion de l'eau, acteurs, usages				
GEODE • Géographie de l'Environnement				p. 46/50
GEOSUD • GEOinformation for Sustainable Development				
GM • Géosciences Montpellier			p. 40	
GREDE • Gouvernance, Risque, Environnement, Développement				
Green • Gestion des ressources renouvelables et environnement				p. 48/52
HSM • HydroSciences Montpellier			p. 42	
IBC • Institut de Biologie Computationnelle	p. 32			
IMFT • Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse				
IRIT • Institut de Recherche en Informatique de Toulouse				p. 46/50/51
ISE-M • Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier	p. 28	p. 33	p. 41/42	
ITAP • Information-Technologies-Analyse environnementale-Procédés agricoles				
L2C • Laboratoire Charles Coulomb	p. 25/26/29	p. 38		
LBE • Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement				
LEASP • Laboratoire d'Épidémiologie et d'Analyses en Santé Publique		p. 38		
LGI2P • Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production				p. 53
LISAH • Laboratoire d'Étude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème			p. 45	p. 46
LISST • Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires				
MARBEC • MARine Biodiversity, Exploitation and Conservation		p. 36		
MIAT • Mathématiques et Informatique Appliquées de Toulouse				p. 46/50/51
MISTEA • Mathématiques, Informatique et Statistique pour l'Environnement et l'Agronomie		p. 33		
MIVEGEC • Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle		p. 34		
Numev • Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant				
OREME • Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement				
SMS • Structurations des Mondes Sociaux				
SYSTEM • Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens				p. 46
TETIS • Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale			p. 45	
TULIP • Towards a Unified theory of biotic interactions : roLe of environmental Perturbations				
UMMISCO • Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes		p. 34/36		p. 50
Virtual Plants • Institut national de recherche en informatique et en automatique	p. 29/30			
XSYS • Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse				
#DigitAg • Institut Convergences Agriculture Numérique				

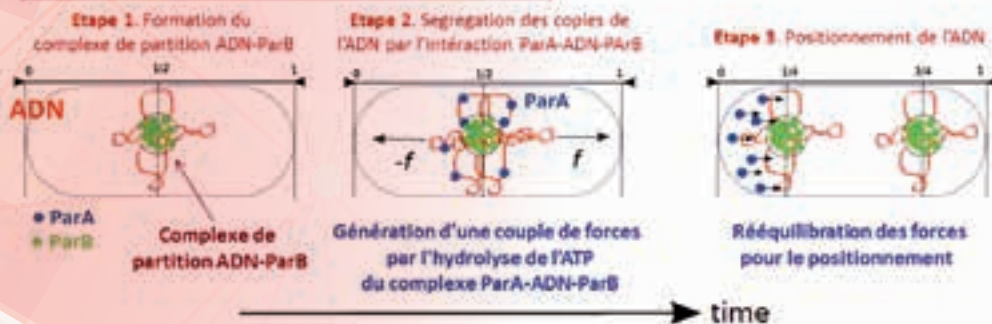
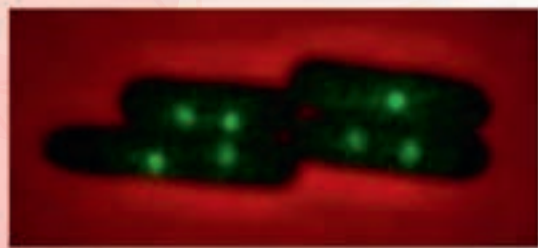
** Un tableau récapitulatif de l'ensemble des thématiques couvertes par les équipes de recherche (et autres structures de recherche) est présenté page 72.

Dynamique des organismes

Modélisation de la ségrégation et du positionnement du génome bactérien

Depuis la découverte de l'ADN (1952), plusieurs générations de scientifiques ont questionné l'origine du mouvement et du positionnement contrôlé de l'ADN bactérien par les systèmes de ségrégation. Parmi ces systèmes, le complexe de partition ParABS, composé d'ADN (ParS) et de deux familles de protéines (ParA et ParB), est le plus répandu parmi les bactéries et aussi le moins connu. Aujourd'hui, il existe une grande quantité de données sur les systèmes de ségrégation grâce aux approches génomiques à haut débit et à la microscopie super-résolutive et quantitative. Ces approches permettent, pour la première fois, d'observer précisément les systèmes de ségrégation et de quantifier leurs propriétés moléculaires.

Depuis 2015, nous développons les modèles physico-mathématiques de ces mécanismes en collaboration avec nos partenaires biologistes, biophysiciens et modélisateurs*. Ces travaux ont permis de découvrir de nouvelles propriétés de la matière biologique composée d'ADN



et de protéines à l'échelle microscopique, comme, par exemple, la localisation spatiale des protéines ParB autour de la séquence d'ADN ParS sans aucun compartiment membranaire de confinement ou la génération d'ondes stationnaires de protéines. Ces ondes permettent la translocation spontanée du complexe génomique de la bactérie (ADN, protéines...) dans un environnement intracellulaire très encombré, mais aussi le positionnement précis et la répartition en parts égales de ce matériel dans les cellules filles après division cellulaire. Comprendre ces mécanismes est très utile pour concevoir des antibiotiques de nouvelle génération, mieux comprendre les mécanismes de contrôle de l'état de l'ADN par des complexes de protéines (même dans les cellules eucaryotes avec noyau !) ainsi que les principes d'organisation de la matière dans le cytoplasme cellulaire. De plus, ces systèmes intéressent les sciences physiques et chimiques, leurs principes de fonctionnement pouvant être appliqués à la séparation des molécules ou de colloïdes en phase fluide, avec des retombées technologiques conséquentes.

Contact : A. Parmeggiani (UMR DIMNP/UMR L2C), andrea.parmeggiani@umontpellier.fr

* **Collaborateurs** : J. Palmeri, J.C. Walter, F. Geniet et J. Dornigac (UMR L2C), J.Y. Bouet (Laboratoire de Microbiologie et Génétique Moléculaires), M. Nollmann (Centre de Biochimie Structurale de Montpellier), C. Broederz (Université Louis-et-Maximilien de Munich, Allemagne), N. Wingreen (Princeton University, États-Unis)

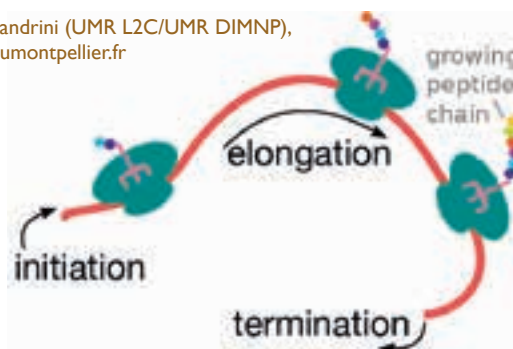
◀ *Visualisation des complexes de partition dans les bactéries et schéma du mécanisme physique de la ségrégation et positionnement de l'ADN bactérien lors de la division cellulaire.* (© J.Y. Bouet). La physique théorique (théorie des transitions de phase, modèles de réaction et diffusion, etc.) permet de construire des modèles de ségrégation et positionnement contrôlés dont la compréhension demeure faible tandis que ces mécanismes sont importants tant pour la biologie fondamentale eucaryote et procaryote que pour la physique de la matière et la chimie. © J.C. Walter

Approches quantitatives de la traduction de l'ARNm (modèles et expériences)

La dernière étape de la synthèse protéique est la traduction du code génétique à partir des nucléotides — encodé dans un ARN messager (ARNm) — en protéines, bases de la vie. Malgré les nombreuses avancées technologiques des dernières décennies et la quantité sans cesse croissante de données expérimentales, les mécanismes qui sous-tendent la traduction de l'ARNm ne sont toujours pas connus. Nos études, quantitatives, s'intéressent à la traduction des ARNm au moyen de modèles en équilibre et hors équilibre inspirés par des approches de mécanique statistique telles que le processus d'exclusion, le modèle de trafic archétype en une dimension (processus d'exclusion simple totalement asymétrique - TASEP). Des modèles sont développés et étudiés analytiquement et grâce à des simulations stochastiques. Les expériences quantitatives visent à étudier la façon dont les déterminants de la séquence d'un ARNm affectent le taux de production de la protéine du gène correspondant. Ce travail est réalisé en collaboration

avec des équipes montpelliéraines et à l'international. Les données expérimentales et de modélisation sont ensuite intégrées pour donner une image plus complète et plus quantitative de ce processus biologique. Nous nous intéressons également aux déterminants de l'initiation de la traduction et de son interaction avec l'élongation, le rôle du biais d'usage du codon, la longueur du gène et la concurrence pour les ressources dans la traduction.

Contact : L. Ciandrini (UMR L2C/UMR DIMNP), luca.ciandrini@umontpellier.fr



► *Processus de traduction de l'ARNm.* L'ARNm (en rouge) est lu par des ribosomes (bleu), qui assemblent la protéine (growing peptide chain) acide aminé par acide aminé selon la séquence nucléotidique. Nos cadres de modélisation, intégrés par des expériences, visent à identifier les déterminants de la vitesse des ribosomes et de l'efficacité de la traduction, largement inconnus.

Modélisation physico-mathématique du transport moléculaire intracellulaire

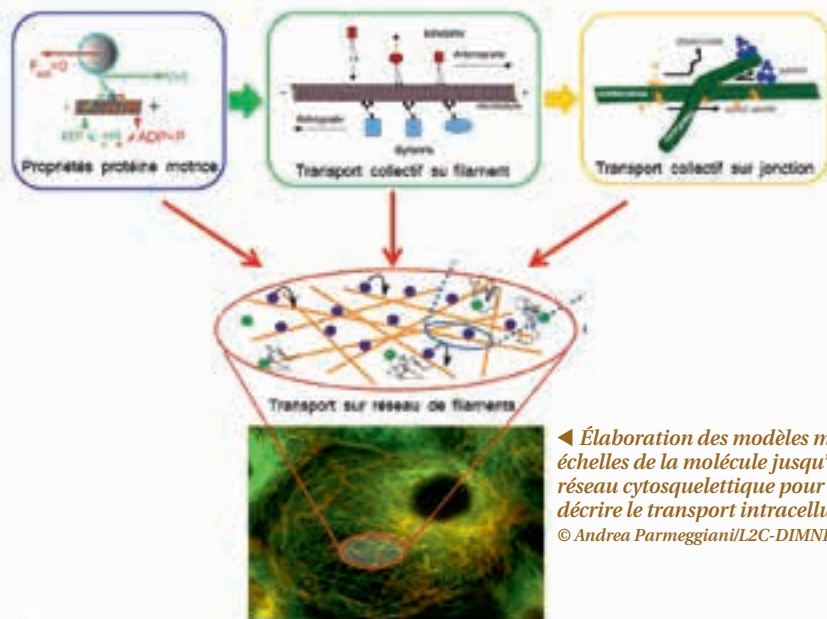
Depuis des années, nous développons, en collaboration avec d'autres instituts de recherche*, la modélisation physico-mathématique du transport moléculaire dans les cellules eucaryotes et, en particulier, l'activité des protéines motrices cytosquelettiques. Ces protéines sont des moteurs moléculaires, surprenantes nanomachines qui se déplacent et produisent les forces nécessaires au déplacement des « cargos » intracellulaires grâce à l'énergie libérée de l'hydrolyse de l'ATP (adénosine-triphosphate), véritable carburant cellulaire. Ces machines utilisent le cytosquelette (« énorme » échafaudage de protéines) et le cytoplasme (milieu intracellulaire) pour se déplacer à grandes distances dans la cellule et emmener là où il faut les matériaux indispensables à toute fonction cellulaire. La métaphore la plus directe du transport cytosquelettique est celle du trafic de toutes sortes de trains, véhicules, personnes et de l'évolution urbaine d'une immense métropole, ou même État entier comme la France, avec la complexité du monde moléculaire très chaotique ! Comprendre comment et pourquoi cette véritable logistique moléculaire se produit est l'une de grandes énigmes de la biologie cellulaire, avec d'importantes implications en médecine. En effet, une dérégulation de ce transport mène à de graves pathologies : anomalies de développement d'un organisme, maladies neurodégénératives, cancers.

Les approches « multi-échelles » mises en place permettent d'analyser le transport moléculaire, depuis la molécule individuelle jusqu'au réseau cellulaire de transport. Ces travaux interdisciplinaires, modélisant aussi la transcription de l'ADN et la traduction de l'ARN, intéressent la physique théorique, la biologie, la bioinformatique et la médecine. En effet, grâce aux modèles développés de physique statistique, non-linéaires et stochastiques, il est possible de comprendre et simuler l'auto-organisation cellulaire, la communication intercellulaire

au travers de la formation, par exemple, de nanotubes de membranes (véritables autoroutes de transport de matière intercellulaire), l'influence de ces processus sur l'émergence de maladies, ainsi que le rôle et l'efficacité des thérapies actuelles ou futures.

Contact : A. Parmeggiani (UMR L2C/UMR DIMNP), andrea.parmeggiani@umontpellier.fr

* **Collaborateurs**: N. Kern, J.C. Walter, F. Geniet et J. Dornig (UMR L2C), M.L. Vignais (Institut de Recherche de Médecine Régénératrice et de Biothérapies, IRBM), J.P. Hugnot (Institute for Neurosciences of Montpellier, INM), B. Charlot (Institut d'Électronique et des Systèmes, IES), T. Virolle (Institut de Biologie Valrose, IBV).



◀ *Élaboration des modèles multi-échelles de la molécule jusqu'au réseau cytosquelettique pour décrire le transport intracellulaire.*

© Andrea Parmeggiani/L2C-DIMNP

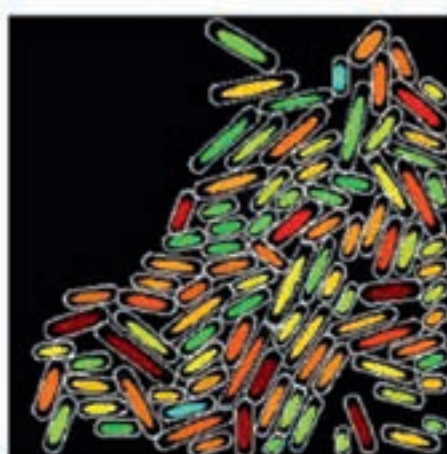
Dynamique stochastique des réseaux de gènes

Les réseaux de gènes sont incontournables en biologie cellulaire et moléculaire moderne. Ils ont un rôle déterminant dans la décision, la différenciation et l'adaptation cellulaire. En biologie synthétique, les circuits et réseaux de gènes sont utilisés pour la détection et le traitement des informations nécessaires aux diagnostics médicaux, biotechnologies ou à la bioinformatique. Des résultats expérimentaux récents montrent que le fonctionnement des réseaux de gènes a un degré élevé de stochasticité au niveau cellulaire ou d'un gène. L'expression génique est contrôlée par des machines moléculaires complexes impliquant l'ADN et des interactions ADN/protéines. Ces machines sont soumises au bruit moléculaire dû à la présence/absence dynamique des membres des complexes protéiques régulateurs, des fluctuations de l'organisation de la chromatine ou, plus généralement, de celles de l'environnement intra- et intercellulaire. La stochasticité de l'expression génique peut avoir un impact phénotypique important, comme le déclenchement ou la rechute de maladies infectieuses, l'adaptation des populations de cellules à un environnement changeant, la résistance au traitement des pathogènes, etc. Cette propriété intrinsèque des dispositifs biologiques est une préoccupation importante de la biologie synthétique où la fiabilité et la flexibilité des dispositifs biologiques sont recherchées.

Notre équipe développe des modèles et méthodes mathématiques pour comprendre le fonctionnement stochastique des réseaux de gènes. En collaboration avec des biologistes du Centre de biochimie

Contacts : O. Radulescu (UMR DIMNP), ovidiu.radulescu@umontpellier.fr; L. Ciandrini (UMR DIMNP/UMR L2C), luca.ciandrini@umontpellier.fr
Collaborateurs : N. Declerck et J. Bonnet (Centre de Biochimie Structurale de Montpellier, CBS), M. Latha et E. Bertrand (Institut de Génétique Moléculaire de Montpellier, IGMM)

structurale (CBS), de l'Institut de Génétique Moléculaire de Montpellier (IGMM) et de l'Université de Chicago (département « Écologie et évolution »), nous quantifions les fluctuations de l'expression génétique, par exemple lors des premiers stades de développement embryonnaire de la drosophile ou lors du changement du métabolisme central du carbone lors de l'adaptation de la bactérie *Bacillus subtilis* à des variations des sources carbonées. Ces travaux ont une importance fondamentale pour comprendre le rôle de la stochasticité dans les systèmes de régulation biologique et pourraient avoir des applications en médecine et biotechnologie.



▲ *Représentation en fausses couleurs de l'expression des gènes glycolytiques, obtenue par microscopie à balayage laser Number & Brightness d'une population de cellules Bacillus subtilis, soumise à un changement de source de carbone.* © D'après Ferguson et al., PNAS, 109:155 (2012). © M.L. Ferguson/CBS Montpellier, 2012

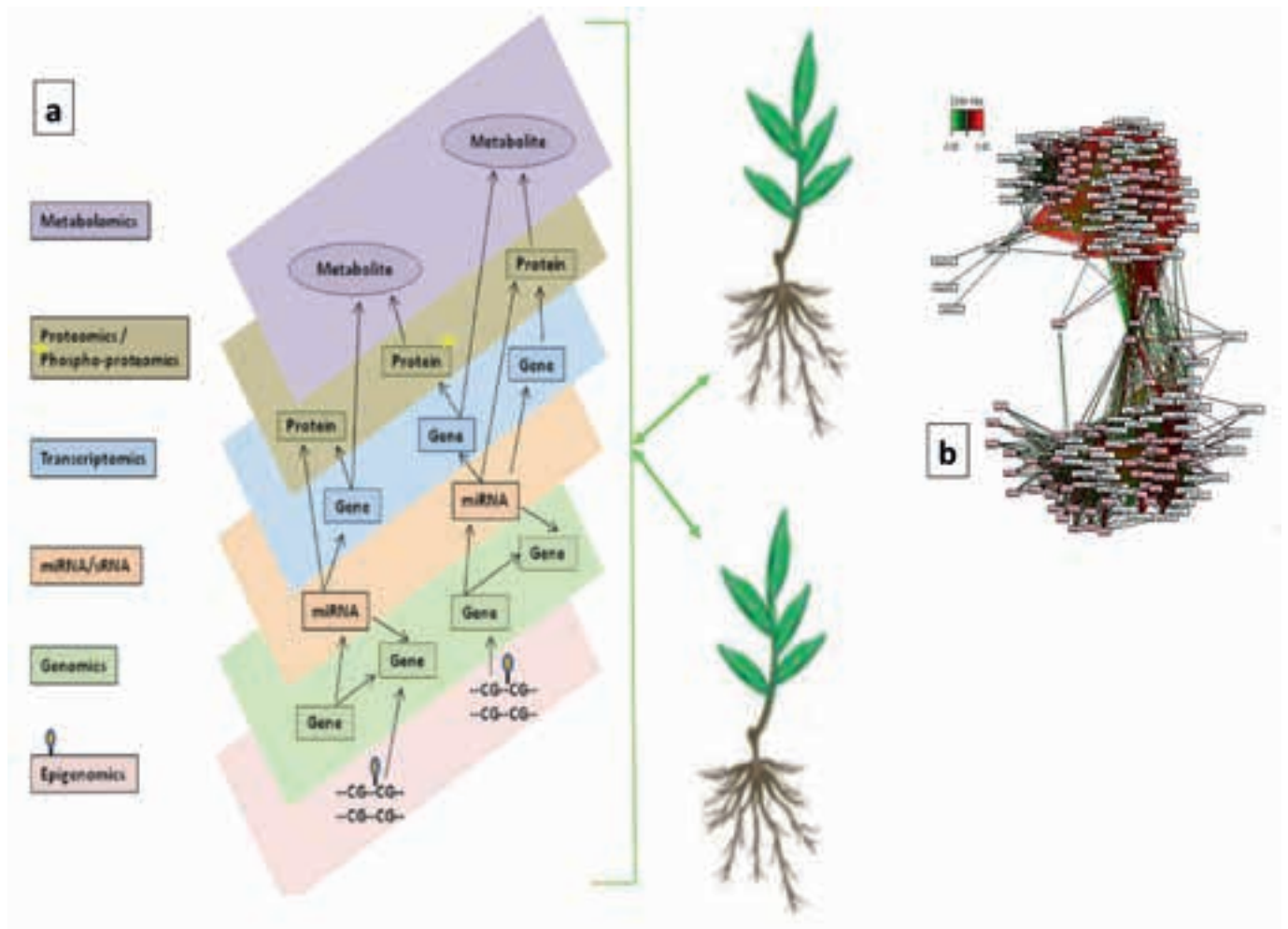
Analyse des réseaux de régulation de l'expression du génome contrôlant l'adaptation aux stress

L'expression des gènes est régulée par différents mécanismes sous contrôle génétique et épigénétique. Le premier niveau dépend de la dynamique de l'épigénome et fait intervenir la condensation de la chromatine liée aux marques histones qui définit l'accessibilité de la séquence génomique aux complexes protéiques de transcription. Le second est la régulation transcriptionnelle des gènes comprenant d'une part une régulation d'origine épigénétique des promoteurs par méthylation des cytosines, et, d'autre part, une régulation de l'activation de la transcription par des éléments cis (boîte de régulation) et *trans* de type facteurs de transcription. Le troisième niveau concerne les régulations post-transcriptionnelles qui font intervenir des petits ARN non codants de type microARN qui vont cliver les transcrits des gènes cibles ou inhiber leur traduction en protéine. Enfin, les modifications post-traductionnelles vont agir sur l'activité des protéines.

L'équipe BURST* (UMR AGAP) appréhende ces mécanismes à l'aide des données omiques (transcriptomique, micro-transcriptomique, analyse de dégradome, et métabolomique), une analyse de type biologie des réseaux ainsi que leur validation par des approches de génomique fonctionnelle. L'intégration et la représentation de ces données sont réalisées à l'aide d'outils bio-informatiques tels que Mixomics, WGCNA (*weighted gene co-expression network analysis*), etc. Ce niveau d'analyse permet d'avoir une compréhension globale des régulations sous stress d'espèces pérennes et d'identifier les mécanismes adaptatifs mis en jeu ainsi que les combinaisons d'allèles favorables pour soutenir les programmes de pré-breeding.

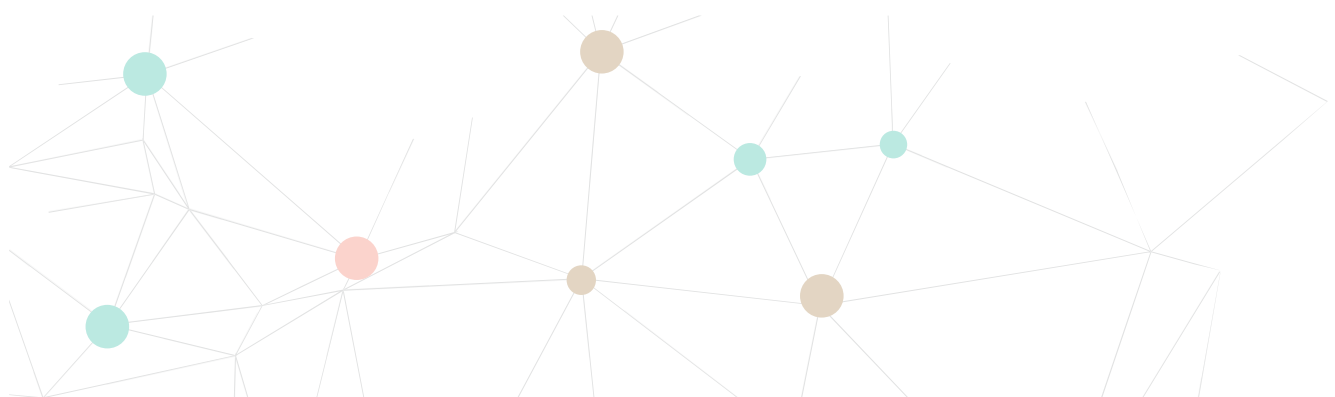
Contact : P. Montoro (UMR AGAP), montoro@cirad.fr

* Biologie cellulaire de la Réponse aux Stress abiotiques et biotiques chez les espèces pérennes (BURST)



▲ A. Schéma intégratif des différents niveaux d'analyses globales allant du génome au phénotype et lien avec les analyses génétiques des caractères d'intérêt agronomique. D'après Shakhawat, 2015.

▲ B. Intégration des données transcriptomiques (blanc) et métabolomiques (rose) chez l'eucalyptus (Favreau, in prep).



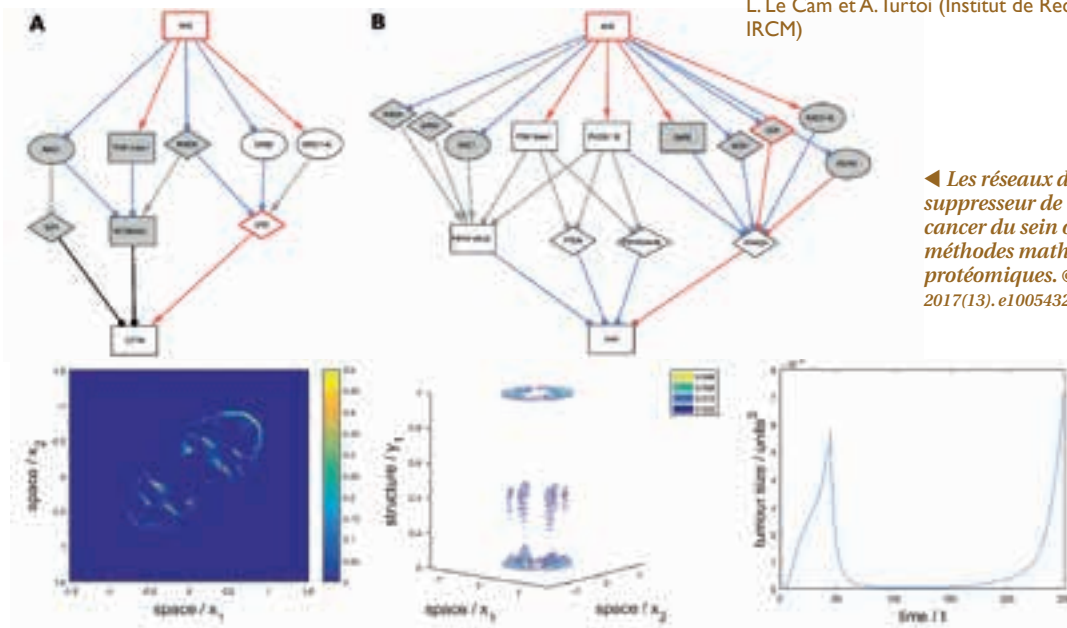
Modélisation multi-échelle de l'invasion tumorale

La capacité invasive des cellules tumorales est déterminée par plusieurs paramètres, y compris l'activation des voies moléculaires intracellulaires contrôlant la prolifération, la migration et le remodelage de leur microenvironnement par des enzymes présentes dans la matrice extracellulaire. En outre, l'importante hétérogénéité du comportement des cellules individuelles est utilisée par les cellules cancéreuses pour résister et échapper à la thérapie. La grande majorité des modèles mathématiques de l'invasion tumorale repose sur des équations aux dérivées partielles (EDP) et contiennent une seule échelle macroscopique. Nous développons de nouveaux modèles multi-échelles des processus d'invasion qui couplent des EDP à différentes échelles et des dynamiques microscopiques intracellulaires. Ces modèles prennent en compte les comportements collectifs cellulaires — croissance, migrations chimio- et

haptotactiques, etc. — ainsi que des processus intracellulaires tels que la signalisation et le remodelage métabolique. Par rapport à des modèles EDP standards, nos modèles multi-échelles décrivent plus précisément les dynamiques des fronts d'invasion et l'adaptation tumorale. En outre, ils prédisent les distributions de cellules non seulement dans l'espace, mais aussi dans la structure (variables internes génétiques et épigénétiques), permettant la compréhension de la résistance aux traitements et des phénomènes connexes tels que l'hétérogénéité zonale. La description précise du métabolisme intracellulaire et la signalisation avec des paramètres qui peuvent dépendre du patient, représentent un atout important pour le développement d'applications telles que les thérapies ciblées et individualisées.

Contact : O. Radulescu (UMR DIMNP), ovidiu.radulescu@umontpellier.fr

Collaborateurs : A. Hodgkinson (UMR DIMNP), P. Coopman, G. Freiss, L. Le Cam et A. Turtoi (Institut de Recherche en Cancérologie de Montpellier, IRCM)



◀ Les réseaux de signalisation élucidant l'effet suppresseur de tumeur de la protéine Syk dans le cancer du sein ont été reconstruits en utilisant des méthodes mathématiques et des données phosphoprotéomiques. © D'après Naldi et al., 2017. Plos Comp.Bio. 2017(13). e1005432

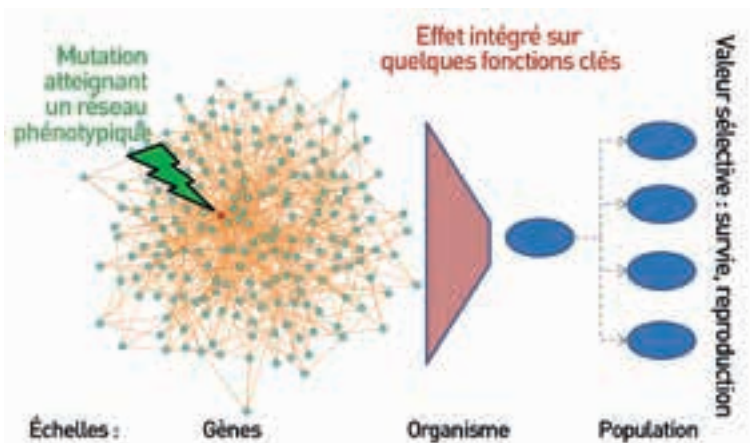
◀ Les modèles mathématiques prédisent la dynamique en quatre dimensions du mélanome soumis au traitement ciblé et mettent en évidence des phénomènes de résistance. Distribution spatiale de cellules tumorales (gauche). Distribution spatio-structurale incluant une dimension mutationnelle (centre); taille de la tumeur en fonction du temps (droite). © Arran Hodgkinson/UMR DIMNP 2017

Modélisation de l'évolution phénotypique à l'aide de la théorie des matrices aléatoires

Le phénomène d'adaptation des êtres vivants est un processus dynamique. Des mutations aléatoires, générées durant la reproduction, se multiplient différemment : celles qui augmentent le taux de reproduction et/ou de survie (valeur sélective) finissent par envahir la population. Ce processus dépend cruciallement de l'éventail des effets des mutations aléatoires sur la valeur sélective. Une telle information est nécessaire pour prédire, par exemple, la capacité d'adaptation d'une population aux changements de son environnement, avec d'innombrables implications pour la biologie, l'agriculture et la médecine. Or, une mutation est d'abord un changement aléatoire dans l'ADN, touchant un gène particulier (voire une zone régulatrice non-codante) qui interagit avec d'autres gènes dans un réseau complexe de régulations et de cascades de réactions. Leur effet intégré sur la reproduction et la survie de l'organisme entier est donc fort difficile à prédire. On peut aborder le problème par un modèle probabiliste décrivant l'effet des mutations comme une variable aléatoire, qui 'percole' jusqu'à la valeur sélective, via un réseau d'interactions elles aussi décrites par des variables aléatoires (figure ci-contre). On a donc des variables aléatoires, peu spécifiées, à chaque échelle d'intégration : gènes, traits phénotypiques, puis valeur sélective de l'organisme entier. Les interactions entre éléments du modèle sont décrites par des matrices dont les éléments sont tirés dans des lois aléatoires, ou « matrices aléatoires ». La complexité du réseau devient alors un atout : diverses lois des grands nombres prédisent les propriétés de ces matrices, lorsque celles-ci sont de grande dimension,

et ce, indépendamment des distributions sous-jacentes. Il est alors possible de prédire la distribution de l'effet des mutations sur la valeur sélective de façon assez générale, puisque les résultats jouissent d'une robustesse équivalente au théorème central limite.

Contact : G. Martin (UMR ISEM), guillaume.martin@umontpellier.fr



▲ **Modèle simplifié de relation mutation génétique-phénotype-valeur sélective.** Une mutation affecte un gène interagissant avec de nombreux autres dans divers réseaux (métaboliques, de régulation, etc.). Cet effet produit de nombreux changements en cascade, qui 'percolent' jusqu'à un nombre limité de traits phénotypiques clés (par ex. la taille) pour lesquels il existe un optimum adaptatif. L'écart entre le phénotype mutant et cet optimum détermine ensuite la valeur sélective du mutant. © G. Martin

Modèles de croissance d'un système multicellulaire végétal

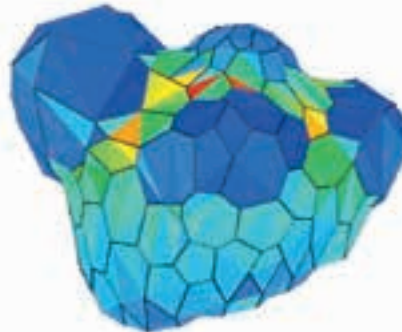
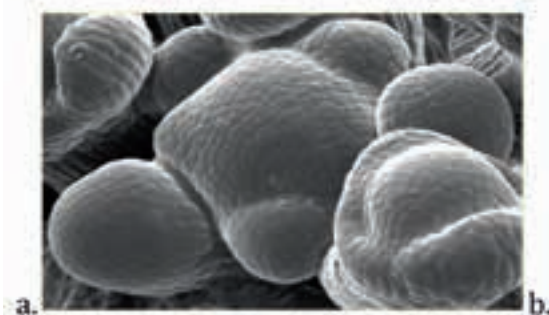
Contrairement au cas des vertébrés, la morphogenèse chez les plantes s'effectue tout au long de leur vie. Cette production continue de nouveaux organes est liée à la présence de niches de cellules non-différenciées aux extrémités des tiges aériennes ou souterraines : les méristèmes. Le fonctionnement de ces méristèmes est un processus dynamique reposant sur la régulation de fonctions physiologiques à différentes échelles par des signaux environnementaux comme la lumière ou l'humidité. Décrypter la réponse développementale des plantes, en fonction de leurs spécificités génétiques et face aux variations de leur environnement, est un enjeu scientifique d'une grande complexité. Ainsi, l'organogenèse au niveau des méristèmes émerge de l'interaction des réseaux de signalisation intercellulaires (hormones, nutriments, contraintes mécaniques...) et intracellulaires (réponse transcriptionnelle à une sollicitation hormonale...). L'étude de ces mécanismes repose sur un triple questionnement :

- La déformation d'un objet matériel suppose la mise en œuvre de contraintes mécaniques. Comment celles-ci sont-elles générées et équilibrées au sein des tissus végétaux où chaque cellule peut être vue comme un effecteur mécanique autonome couplé à ses voisins ?

- Les signaux émis et reçus par les cellules dans un contexte tissulaire sont nombreux et de modalités variées (champs moléculaires diffusifs, contraintes mécaniques, interactions de contact). Comment leur intégration conduit-elle à un comportement morfo-mécanique cohérent ?
- Finalement, comment cette dynamique peut-elle être modulée par des facteurs extérieurs ?

Pour répondre à ces questions, l'équipe Virtual Plants (Inria) en collaboration avec le laboratoire de Reproduction et Développement des Plantes à l'École normale supérieure de Lyon, développe une approche théorique complétée par des outils numériques et des techniques d'observations quantitatives. Cette approche permet d'analyser le comportement des méristèmes et d'en faire des simulations numériques permettant de tester différentes hypothèses de fonctionnement. Une plateforme numérique de simulation et d'analyse de morphogenèse tissulaire végétale, TissueLab, permet d'intégrer, de tester, de simuler et de capitaliser l'ensemble des modèles et outils développés dans ce cadre.

Contact : C. Godin (équipe-projet Virtual Plants), christophe.godin@inria.fr



◀ **a. Méristème apical d'*Arabidopsis thaliana*.** Le méristème produit successivement des organes.
© Jan Traas

◀ **b. Simulation 3D de la croissance d'un organe latéral (ici vue latérale digitale d'une jeune fleur).**
D'après Boudon et al., 2015. Plos Comp Biol.

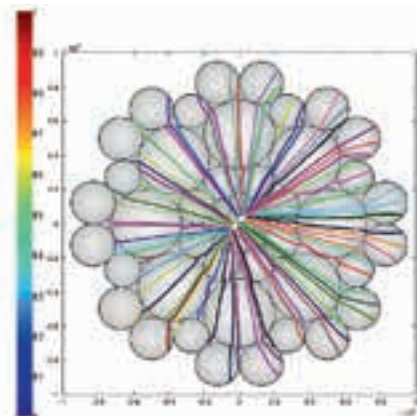
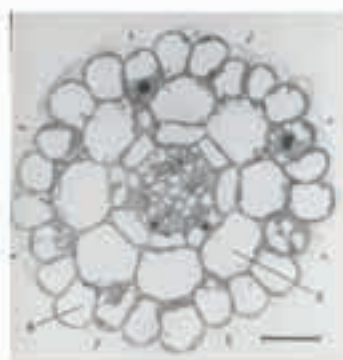
Modélisation et expérimentation de l'eau dans les tissus de la racine

Améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau est un enjeu majeur de l'agriculture pour répondre aux besoins nutritionnels croissants de la population mondiale. Comprendre comment l'eau est répartie dans la plante, en particulier dans la racine, est un défi pour les chercheurs. Nous développons un modèle mathématique de diffusion radiale de l'eau depuis le sol jusqu'aux vaisseaux conducteurs. Dans une section 2D de racine, ce modèle (basé sur des équations aux dérivées partielles résolues par la méthode des éléments finis) visualise le potentiel de l'eau dans les tissus ainsi que ses trajectoires préférentielles (fig. ci-dessous). Ces résultats remettent en cause la vision — toujours enseignée — de trajets de l'eau en parallèle entre cellules et parois, pour un trajet en « série ».

Les cellules végétales sont entourées d'une paroi dont la rigidité, conjointement au flux d'eau, permet l'établissement d'une pression de turgescence. Ce phénomène est à l'origine de propriétés cruciales pour la vie de la plante comme la verticalité ou encore la croissance en sol.

Inversement, cette rigidité soulève des problèmes développementaux puisque les cellules, pour s'étendre et se diviser, doivent contrer la limitation de volume imposée par la paroi. Le bon développement des plantes résulte donc d'un jeu subtil entre propriétés mécaniques et état hydrique des cellules. Dans l'avenir, ce modèle sera étendu au couplage hydraulique/mécanique dans les cellules végétales, afin de comprendre le fonctionnement des tissus dans des conditions environnementales non stationnaires ou lors du développement d'organes. Pour réaliser un tel modèle, plusieurs raffinements sont nécessaires : distinction entre potentiel de l'eau et turgescence, lois de conservation de la masse en conditions fluctuantes, lois de conservation de l'énergie mécanique pour les parois, relations entre forces et déformation... Les techniques de résolution sont également à développer, car il s'agit d'un problème multi-échelle et multi-physique.

Contacts : D. Felbacq (UMR L2C), didier.felbacq@umontpellier.fr, Y. Boursiac (UMR B&PMP), yann.boursiac@inra.fr



▲ **L'eau dans la racine d'*Arabidopsis*.** Gauche : coupe radiale de racine en microscopie optique. Milieu : potentiel de l'eau dans les tissus de la racine. Droite : trajectoires de l'eau en condition stationnaire. © D. Felbacq & Y. Boursiac.

Modèles probabilistes et méthodes d'inférence statistique : identification de patterns de développement dans les données de phénotypage de plantes

Les progrès récents en agronomie reposent sur la révolution génomique couplée avec des avancées technologiques permettant d'acquérir de nouvelles données de phénotypage de plantes à des échelles variées. De nouvelles approches sont nécessaires pour caractériser les processus de développement de la plante, depuis les échelles tissulaires jusqu'à celle de la plante entière. Les plateformes robotisées de phénotypage produisent des données spatio-temporelles de développement de plantes à haut débit et permettent d'étudier l'effet de facteurs environnementaux et génétiques sur le développement des plantes dans un contexte renouvelé. Les méthodes d'analyse des données de phénotypage de plantes sont en pleine mutation du fait de la disponibilité de données massives à faible coût, de l'augmentation des puissances de calcul et de l'émergence de nouveaux paradigmes mathématiques à l'interface entre modélisation probabiliste, inférence statistique et reconnaissance des formes. Les données de phénotypage sont intrinsèquement structurées (spatio-temporelles, multi-échelles), ce qui nécessite de développer des modèles probabilistes et des méthodes d'inférence appropriés pour les analyser.

Ce nouveau paradigme pour analyser de telles données est caractérisé par :

- Des données structurées en séquences, séries temporelles, arborescences, graphes ou images 2D et 3D.
- Des modèles intégratifs qui combinent à la fois des variables réponses, des variables explicatives et des variables latentes pour modéliser des structures à différentes échelles (par ex. des stades de développement ou des phases de croissance). Des dépendances complexes entre ces variables souvent indexées par une structure comme une série temporelle ou une arborescence peuvent être représentées par des modèles graphiques probabilistes.
- Un cadre d'inférence étendu qui concerne l'estimation de paramètres mais aussi la structure du modèle (en utilisant des techniques de sélection de modèles) ainsi que des structures latentes (par ex. la segmentation en stades de développement ou en phases de croissance).

Contact : Y. Guédon (UMR AGAP), yann.guedon@cirad.fr

Modèles « structures-fonctions » des plantes

Les demandes sociétales pour une agriculture plus écologique et durable dans un contexte de changement climatique exigent une meilleure compréhension du fonctionnement et du développement des plantes. Pour cela, une approche prenant en compte explicitement la structure en croissance des plantes pour simuler l'interaction complexe entre les processus qui gouvernent cette croissance et la structure s'est développée depuis quelques années, appelée *Functional Structural Plant Model* (FSPM). Cette approche transdisciplinaire à l'interface de la biologie, l'informatique et la physique, permet d'intégrer, sous la forme d'un modèle 3D dynamique, des connaissances sur la morphologie et le fonctionnement des plantes. Elle permet notamment d'étudier le rôle de la structure des plantes sur différents processus écophysiologiques tels que l'interception de la lumière ou la propagation de maladies, pour la partie aérienne, ainsi que les relations racine/sol. Elle nécessite donc d'assembler les différents outils et modèles hétérogènes développés par la communauté scientifique, en utilisant par exemple les méthodes

proposées par la plateforme OpenAlea. L'équipe Virtual Plants (Inria/Cirad) participe à l'élaboration de nombreux outils pour la simulation de la croissance et de différents processus écophysiologiques tels que ceux mécaniques, de captation de la lumière, d'allocation de carbone, etc. Elle développe ou collabore également à la construction de différents modèles FSPM, représentant les parties aériennes ou souterraines et allant des herbacées (blé, maïs, sorgho) aux arbres fruitiers (manguier, pommier). Les défis en cours autour de ces problématiques sont de permettre une utilisation en ligne de ces outils complexes pour des simulations distribuées sur le web ainsi que la standardisation d'un certain nombre d'outils de simulation de processus écophysiologiques. D'un point de vue applicatif, les défis à venir sont l'intégration de ces modèles à différentes échelles dans des modèles de culture, pour prendre en compte à la fois la variabilité génétique et l'hétérogénéité spatiale des populations simulées.

Contact : F. Boudon (UMR AGAP/Équipe-projet Virtual Plants), frederic.boudon@cirad.fr

◀ *Simulation stochastique d'un mangouier. Différents stades phénologiques de la croissance sont représentés avec l'apparition de nouvelles pousses feuillées (en haut à droite), d'inflorescences (en bas à gauche) et la croissance des fruits (en bas à droite).*
© F. Boudon/Cirad/Inria



Modélisation et simulation de la croissance des plantes : un système dynamique et complexe

La structure d'une plante résulte d'un schéma de déploiement génétiquement déterminé mais dont l'expression est modulée par l'environnement. Elle matérialise un double mécanisme liant développement — ou organogénèse : mise en place de nouveaux organes par des méristèmes terminaux — et croissance — expansion des organes jusqu'à maturation. Les modèles de développement (dits « structuraux ») permettent des représentations réalistes des plantes, mais sans quantifier la biomasse alors que les modèles de croissance lient la photosynthèse produite par la surface foliaire aux ressources (eau, lumière). L'offre en biomasse se répartit dans les compartiments de la plante proportionnellement à leurs demandes. Sur les cultures aux conditions environnementales stables, ces modèles permettent de bonnes prédictions. Les modèles structures-fonctions couplent dans un système dynamique développement et croissance, *via* des simulateurs plus ou moins compliqués.

Dans l'approche *GreenLab*, l'organogénèse est stochastique, définie par des lois de fonctionnement probabiliste des méristèmes (croissance, ramification, mortalité) déduites d'observations. À chaque cycle de croissance, de nouvelles cohortes d'organes sont générées. Conjointement, le modèle de

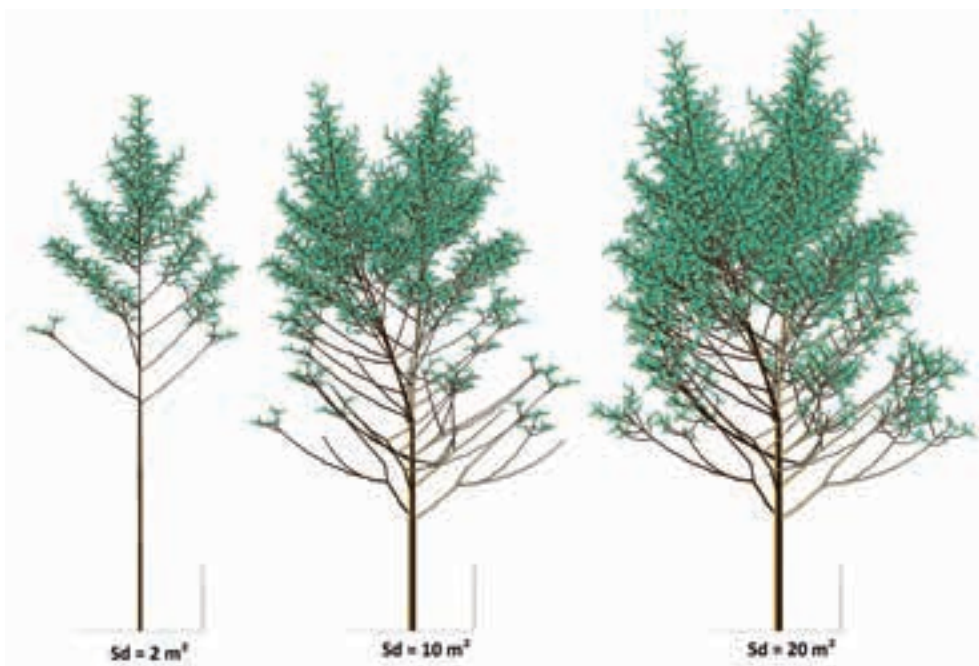
croissance est appliqué : celle-ci est calculée pour chaque cohorte selon la demande de la plante et l'offre disponible. Le rapport offre/demande est considéré comme une pression exercée par l'offre disponible en biomasse sur les méristèmes et les organes agissant directement sur leurs fonctionnements. En impactant les lois de probabilités, ce rapport permet la rétroaction de la croissance sur le fonctionnement des méristèmes et, par conséquent, sur le développement de l'architecture. Ce choix, issu des équations du modèle, est cohérent avec de nombreuses observations faites sur les plantes : sur les arbres, l'architecture montre une grande plasticité en fonction des conditions environnementales ; les simulations illustrent des propriétés émergentes reconnues des systèmes complexes telles que l'apparition de phénomènes pseudo-rythmiques sur la fructification pour certaines plantes agronomiques ou sur l'apparition de branches maîtresses sur des arbres matures.

Contacts : M. Jaeger, marc.jaeger@cirad.fr et P. De Reffye, ph.dereffye@gmail.com (UMR AMAP)

Plus d'informations : <http://greenlab.cirad.fr/GLUVED/>
www.quae.com/fr/r5053-architecture-et-croissance-des-plantes.html
https://interstices.info/jcms/c_38032/une-histoire-de-la-modelisation-des-plantes



◀ *Simulation de l'effet de la lumière sur la rétroaction croissance-développement illustrant la plasticité architecturale dans le modèle *GreenLab* pour un même arbre de 15 ans. La biomasse synthétisée est proportionnelle au rayonnement. Son augmentation accroît la valeur du rapport offre/demande, ce qui a un effet direct sur l'intensité du développement. D'après Mathieu et al., 2009. Annals of Botany. 103(8): 1173-1186.*



▲ *Simulation de l'effet de la densité sur le développement et l'architecture par rétroaction croissance-développement illustrant la plasticité architecturale dans le modèle *GreenLab*. La surface de production disponible (S_d) est d'autant plus faible que la densité est forte. Cette surface limite la production par arbre et donc le rapport offre sur demande, ce qui par rétroaction diminue l'intensité de ramification et raccourcit la durée de vie des branches. D'après Hua et al., 2011. CASE. IEEE. 4: 185-188.*

Institut de biologie computationnelle (IBC) : développement de méthodes innovantes pour l'étude des systèmes biologiques

Depuis 2012, l'IBC innove en concevant des méthodes bioinformatiques pour analyser, interroger ou visualiser des données numériques provenant de systèmes biologiques. Ces algorithmes et méthodes participent au faisceau d'outils nécessaires pour mener des projets de recherche de plus en plus souvent basés sur d'importants volumes de données digitales telles que les séquences génomiques, les images, les structures biochimiques. Plusieurs axes de recherche de l'IBC s'investissent dans l'application de ces méthodes à l'analyse de systèmes complexes, comme l'illustrent deux exemples.

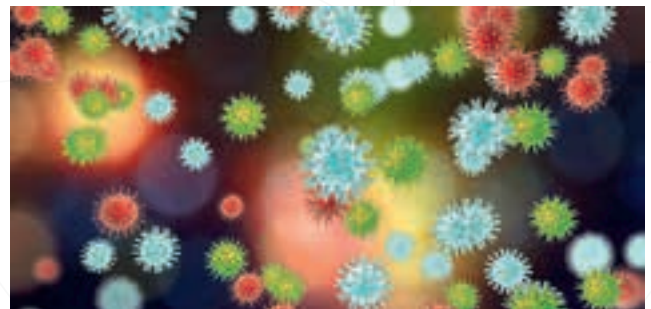
Dans un individu infecté par un unique virus ARN, plusieurs haplotypes du même virus apparaissent, coexistent et évoluent. Leurs génomes accumulent progressivement des mutations qui les différencient et permettent à certains haplotypes de résister au système immunitaire ou à un traitement. La composition en haplotypes et les mutations qu'ils portent, influencent la dynamique évolutive aussi bien que l'évolution de la maladie, certains haplotypes portant des mutations délétères pouvant néanmoins persister grâce à des phénomènes d'auto-stop évolutif ou à l'interaction entre quasi-espèces. Pour pouvoir suivre cette dynamique en termes de composition virale lors d'une infection grâce à du séquençage à haut débit, nous avons conçu un algorithme d'assemblage de génomes de novo qui reconstruit simultanément les génomes des haplotypes présents et estime leur fréquence relative dans l'échantillon séquencé.

L'IBC a aussi développé un système de modélisation du méristème qui permet de suivre les lignées de cellules dans les trois dimensions spatiales au cours du développement de la plante. Alimenté par des images de microscopie à haute résolution, l'outil segmente ces

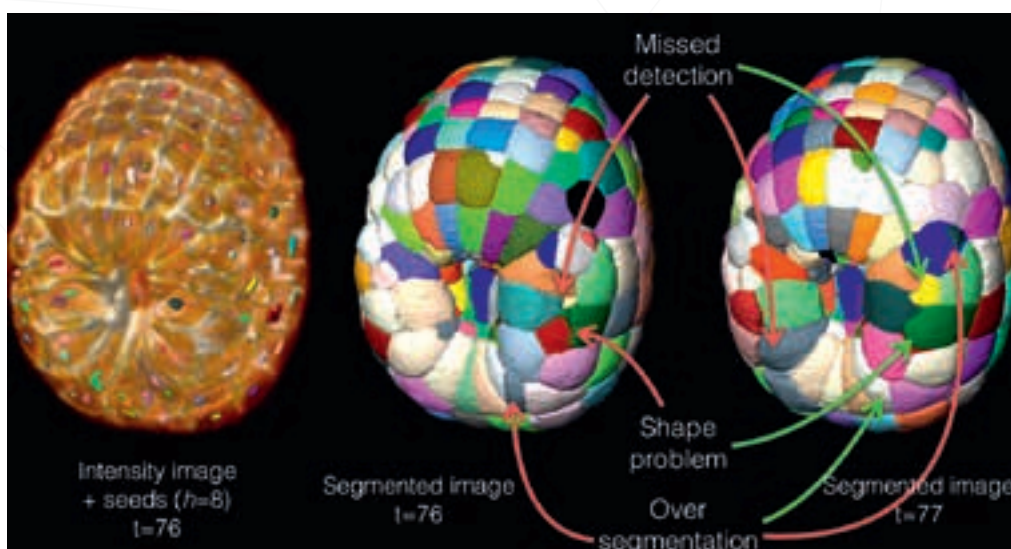


images pour identifier la membrane de chaque cellule, puis calcule les liens de lignée cellulaire entre les images successives dans le temps. L'expérimentateur peut visualiser et suivre la position relative des cellules du méristème dans le temps : leur profil d'expression génique et leurs interactions influencent leur position au sein du méristème.

Contact : E. Rivals, rivals@lirmm.fr
Plus d'informations : www.ibc-montpellier.fr



▲ Image d'artiste d'une multitude de virus. © MASTERFILE



▲ Segmentation des images en cellules. © Léo Guignard

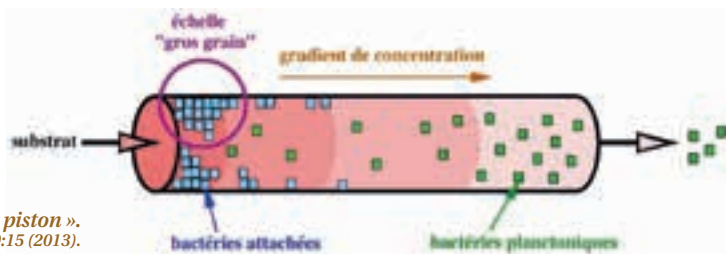
Dynamique des populations

Les biofilms bactériens : vers une modélisation « hybride »

Les biofilms, assemblages de bactéries et de la matrice adhérente qu'elles sécrètent, sont présents dans de nombreux écosystèmes naturels. Ils comprennent des milliards de micro-organismes appartenant à des centaines, voire des milliers, d'espèces, et peuvent former des structures tridimensionnelles variées. Un biofilm est typiquement un système complexe, par le fait qu'il est composé d'un très grand nombre d'individus et que leurs interactions dépendent à la fois de la structure spatiale du biofilm et de la diversité bactérienne. Dans les systèmes récents d'épuration des eaux, les biofilms participent au fonctionnement en améliorant l'efficacité du traitement bactérien dans les bioréacteurs. Les modèles fonctionnels de biofilms doivent coupler biodiversité et structure spatiale, en intégrant des hypothèses réalistes sur les interactions entre les bactéries et la matrice de polymères qu'elles produisent. Une description macroscopique effective est donc insuffisante. Les modèles couramment utilisés sont stochastiques et individus-centrés, i.e. chaque bactérie est simulée avec sa richesse de comportements, ce qui peut devenir très coûteux pour de grandes populations. Nous proposons de dériver des versions réduites de ces modèles individus-centrés, par homogénéisation et approximations des premiers moments, afin de capturer les propriétés statistiquement robustes de ces

modèles computationnels en termes de modèles mathématiques plus synthétiques. La considération de dynamiques multi-échelles hybrides, stochastiques ou déterministes selon la taille de la population, a révélé des résultats surprenants et de portée générale : une étude de modèles « macroscopiques » obtenus par changement d'échelle à partir de modèles de saut pur au niveau microscopique, révèle des zones de l'espace d'état « sensibles » à la taille de la population. Le résultat notable est que les « faibles populations », pour lesquelles les termes stochastiques ne peuvent être négligés, vont jusqu'à des tailles contenant un plus grand nombre d'individus qu'attendu.

Contacts : A. Lesne (UMR LPTMC), lesne@lptmc.jussieu.fr, F. Campillo (Inria), fabien.campillo@inria.fr, A. Rapaport (UMR MISTEA), alain.rapaport@inra.fr
Plus d'informations : travaux réalisés dans le cadre de l'ANR DISCO, <https://sites.google.com/site/anrdisco>



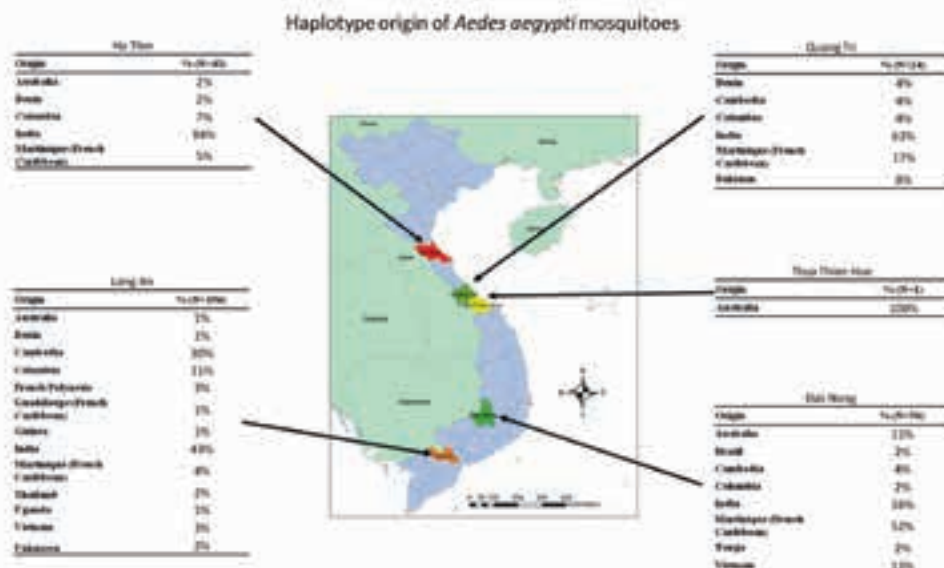
► Schéma d'un bioréacteur de type « piston ». D'après Deygout et al. *Ecological Modelling*, 250:15 (2013).

Paramètres éco-évolutifs de l'émergence des maladies transmissibles

L'émergence ou la réémergence de maladies transmissibles dans une espèce ou une population est le résultat de processus complexes de mieux en mieux compris. Cependant, malgré les avancées théoriques, les modèles échouent à anticiper ces émergences. Étudier les émergences nécessite d'intégrer des données à différentes échelles biologiques (gène, génome, population, métapopulation), spatiales (locale, régionale et mondiale) et temporelles (court et long termes). L'ISEM et ses partenaires*, étudient les dynamiques épidémiques et évolutives de différents agents pathogènes dans les populations hôtes, afin de mieux comprendre, et prévenir, l'implantation de nouveaux pathogènes et l'apparition d'épidémies. L'institut travaille principalement sur des maladies dites « vectorielles » (transmises par des arthropodes hématophages). L'approche pluri- et interdisciplinaire utilisée s'appuie sur des compétences reconnues en écologie parasitaire, évolution et co-évolution, santé publique et vétérinaire, analyse de données biologiques complexes, etc. Par exemple, l'agent pathogène de la dengue, bien que central, n'est pas le principal déterminant du déclenchement et du

maintien des épidémies. Les espèces de moustiques vectrices présentes dans une zone géographique donnée (principalement *Aedes aegypti* et *A. albopictus*, le moustique tigre) sont tout aussi importantes. Au-delà des espèces elles-mêmes, les différentes lignées de chaque espèce peuvent présenter des capacités différentes à transmettre la maladie (capacité vectorielle) et donc influencer la dynamique de la maladie elle-même. Ainsi, l'analyse des lignées de vecteurs réalisée au Vietnam entre 2012 et 2014 (fig. ci-dessous) a mis en évidence que (i) les espèces vectrices majoritaires ne sont pas les mêmes dans différentes zones géographiques, (ii) les lignées porteuses du virus sont systématiquement des lignées déjà détectées dans d'autres zones géographiques (Afrique, Océanie, Amérique du Sud ou même Europe) et (iii) la densité totale d'une espèce de moustique n'est pas un déterminant majeur de l'épidémie.

Contacts : L. Gavotte, laurent.gavotte@umontpellier.fr et C. Moulia, catherine.moulia@umontpellier.fr (UMR ISEM)



* Cirad, Inria, Universités de Barcelone et de Varsovie, Gadjah Mada University et National Institute of Health Research and Development (Indonésie), National Institute of Hygiene Epidemiology (Vietnam), Universiti Putra Malaysia (Malaisie), Mahidol University (Thaïlande).

◀ Distribution des haplotypes des populations de moustique *A. aegypti* au Vietnam. © Laurent Gavotte

Modélisation de la dynamique d'invasion du moustique tigre *Aedes albopictus* dans le Sud de la France

Depuis l'année 2004, le Sud de la France fait face à un nouvel envahisseur. D'abord détecté à la frontière italienne, le moustique tigre a depuis envahi tout le pourtour méditerranéen. Cette invasion biologique n'est pas qu'un problème de nuisance dû à l'agressivité de ce moustique, c'est également une potentielle bombe sanitaire car il peut transmettre de nombreux virus (chikungunya, dengue, zika, etc.). C'est dans ce contexte qu'un partenariat s'est mis en place entre la Direction Générale de la Santé, le Centre National d'Expertise des Vecteurs, les Ententes Interdépartementales de Démoustication (EID-Méditerranée, EID-Rhône Alpes) et l'UMR MIVEGEC pour développer un cadre de modélisation permettant de prédire la dispersion de ce moustique sur le territoire métropolitain. Grâce à la mise à disposition des données de surveillance du moustique tigre sur plus de 1 300 pièges fournies par l'EID, des modèles statistiques ont été développés afin de comprendre la contribution des différents facteurs environnementaux (type d'habitat, température, précipitations, etc.) et humains (transport passif des moustiques adultes par les véhicules notamment) à l'expansion de ce moustique exotique.

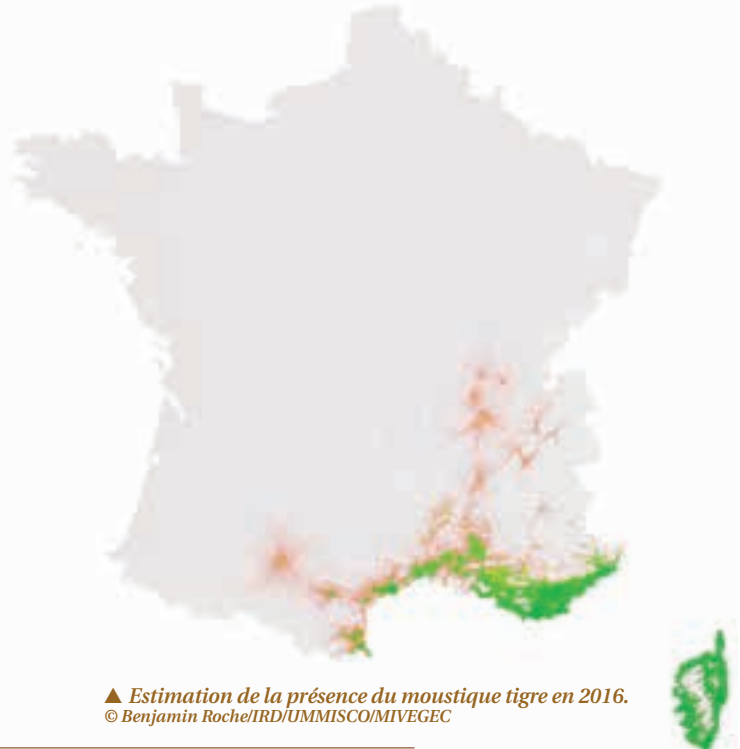
Il a ainsi été possible de mettre en évidence que la dispersion du moustique dans l'hexagone était un phénomène dynamique, avec une expansion en cours vers le Nord et l'Ouest de la France, vers des territoires qui sont aujourd'hui colonisés. Le modèle a également mis en

évidence le rôle majeur joué par l'homme et ses transports, notamment routiers, dans le processus d'invasion en révélant une corrélation étroite avec le réseau autoroutier. Enfin, cette analyse statistique a démontré que le processus d'invasion s'accélère, laissant craindre une arrivée rapide du moustique dans les grandes agglomérations qui apparaissent comme l'environnement privilégié pour l'implantation des propagules. Cette modélisation statistique sophistiquée a ainsi pu permettre aux autorités d'anticiper l'arrivée du moustique tigre dans ces zones qui n'étaient pas préparées pour faire face à cette nouvelle menace sanitaire.

Contacts : B. Roche (UMR MIVEGEC/UMMISCO), benjamin.roche@ird.fr, F. Simard (UMR MIVEGEC), frederic.simard@ird.fr



▲ Le moustique tigre, *Aedes albopictus*.
© Nil Rahola/IRD/MIVEGEC



▲ Estimation de la présence du moustique tigre en 2016.
© Benjamin Roche/IRD/UMMISCO/MIVEGEC

Le comportement explique la démographie

Les populations d'espèces animales évoluées sont constituées d'individus aux caractéristiques différentes. Certaines peuvent être aisément identifiables telles l'âge ou le sexe, mais d'autres, résultant d'interactions complexes entre leur génome et l'environnement, sont plus difficilement atteignables. Parmi les caractéristiques les plus évoluées, on peut citer le comportement. Du fait de son comportement particulier, chaque individu va avoir des interactions propres avec son environnement et ses congénères, et ce comportement va déterminer ses performances démographiques (survie, reproduction) et *in fine* sa valeur sélective. Cependant, les études démographiques classiques traitent les individus comme essentiellement identiques à l'intérieur de grandes catégories. Quant à la science du comportement, l'écoéthologie, elle tend à travailler sur des durées courtes, ne permettant pas facilement la projection des conséquences de ses observations en termes démographiques.

Une étude récente des parades nuptiales du flamant rose montre l'intérêt et la nécessité de rapprocher comportement et démographie. La complexité de la parade favorise l'accès à la reproduction dans cette espèce. Les individus les plus âgés ont en moyenne des parades moins complexes que les individus d'âge moyen et sont donc sous-représentés parmi les reproducteurs, mais, s'ils parviennent à se reproduire, leur probabilité d'amener leur unique poussin à l'envol est identique. L'observation des seuls reproducteurs ne permet donc pas de détecter une sénescence reproductive pourtant bien réelle. Dans d'autres études,

l'intégration du comportement et de la démographie, plus poussée, est faite au niveau même de l'analyse. Ainsi peut-on établir que la mésange charbonnière, fidèle à son partenaire de l'année précédente, a une survie nettement plus élevée, et de plus, une plus grande chance de retrouver le même partenaire l'année suivante, ce qui favorise à la fois la persistance des couples et la survie. Ce genre d'études combinées a toute chance de se développer.

Contacts : R. Pradel, roger.pradel@cefe.cnrs.fr et R. Choquet (UMR CEFE), remi.choquet@cefe.cnrs.fr, A. Béchet (Tour du Valat), bechet@tourduvalat.org

Plus d'informations :
<https://tourduvalat.org/publications/article-sexual-display-complexity-varies-non-linearly-with-age-and-predicts-breeding-status-in-greater-flamingos/>
<https://anticaculina.wordpress.com/my-work-as-evolutionary-biologist-and-zoologist/biology-pair-fidelity-and-divorce-in-monogamous-birds/>



▲ Postures du Flamant-rose.

Environnement-santé : modélisation multi-échelle de systèmes épidémiologiques

Comprendre, modéliser et prédire le comportement des systèmes éco-épidémiologiques associés aux maladies vectorielles impliquent de considérer l'homme, le(s) vecteur(s), le(s) agent(s) pathogène(s), le(s) réservoir(s) de ces pathogènes, ainsi que les interactions entre ces éléments à différentes échelles spatiales et temporelles. Les propriétés de ces éléments et leurs interactions dépendent de multiples facteurs (génétique, sociodémographique, environnemental, etc.). L'UMR ESPACE-DEV et ses partenaires* étudient les relations environnement-santé (maladies vectorielles humaines en milieu intertropical), avec une approche interdisciplinaire. La notion d'échelle, au cœur des réflexions méthodologiques, est abordée de manière variée, par exemple :

- Les distributions spatiales des vecteurs de la maladie de Chagas dans une localité brésilienne et les taux d'incidence du paludisme dans un village de Guyane française sont étudiés *via* la décomposition en coordonnées principales de matrices de voisinages pondérés. Des méthodes avancées d'analyse factorielle permettent d'identifier les facteurs environnementaux et sociodémographiques explicatifs des composantes spatiales, et leur importance relative, selon les échelles d'analyse et zones considérées.
- La modélisation de la distribution spatiale de la dengue aux niveaux régional (Pacifique Sud), territorial (communes, Nouvelle-Calédonie) et local (quartier, Nouméa) a montré l'intérêt d'une approche multi-échelle (cf. fig. 1 ci-contre).
- Sur l'île de La Réunion, la spatialisation d'un paramètre-clé d'un modèle de prédiction des densités d'*Aedes albopictus* (vecteur de la dengue et du chikungunya) permet de lier l'échelle du gîte larvaire et celle de l'île entière. Cette spatialisation s'appuie sur une carte d'occupation du sol dérivée de données satellitaires et sur des modélisations mécanistes et statistiques (cf. fig. 2 ci-dessous).
- En Indonésie, les principaux facteurs de la dynamique de diffusion du chikungunya ont été pris en compte pour construire un modèle multi-agent qui permet d'élaborer des scénarios à destination des acteurs de la santé. Ces travaux contribuent à élaborer des outils de planification des actions de prévention des épidémies et de lutte anti-vectorielle à différentes échelles.

Contacts : E. Roux, emmanuel.roux@ird.fr, M. Mangeas, morgan.mangeas@ird.fr et V. Herbretreau, vincent.herbretreau@ird.fr (UMR ESPACE-DEV)

Collaborateurs : N. Dessay, M. Fargette et T. Libourel (UMR ESPACE-DEV)

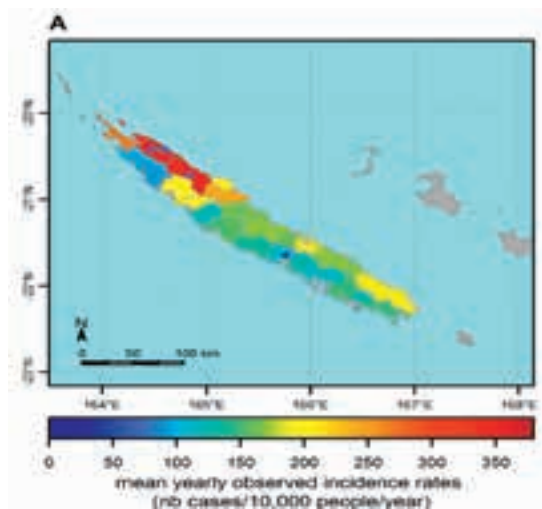
***Partenaires :**

Études Réunion : Cirad/AGIRs, ARS-Réunion, bureau d'étude Marie Demarchi, Univ. Réunion ;

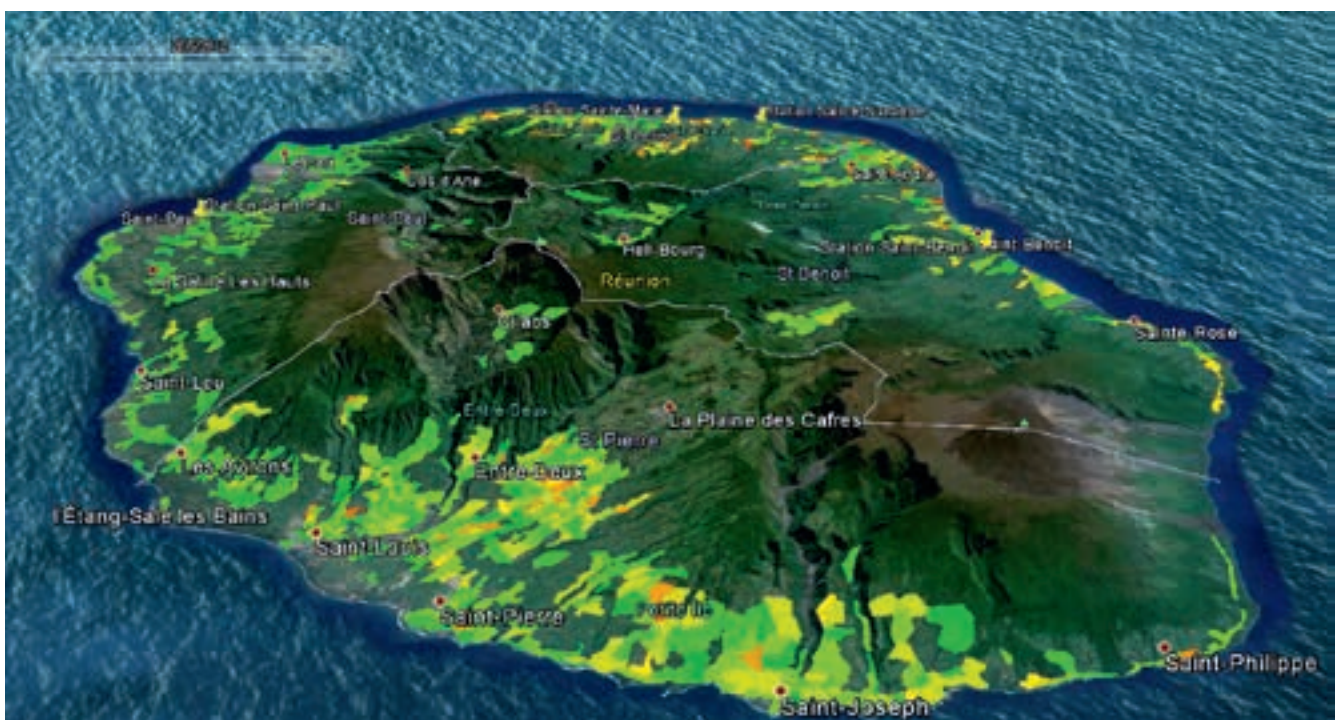
Études Guyane : UnB/CDS (Brésil), Univ. Paris Descartes, UM, UG/EpaT ;

Études Nouvelle-Calédonie : DASS-NC, SIPRES Mairie de Nouméa, Institut Pasteur NC ;

Étude Indonésie : UM, Center for Tropical Medicine, Faculty of Medicine, Gadjah Mada University, Sukoharjo Regency Health Center, Center of Java.



▲ Figure 1. Distribution spatiale de l'incidence de la dengue en Nouvelle-Calédonie.



▲ Figure 2. Distribution spatiale de la densité d'*Aedes Albopictus* dans l'île de La Réunion.

© Annelise Tran/Cirad/Projet Alborun (ARS Océan Indien)

Connectivité des populations marines : modélisation individu-centrée des échanges de larves de mérrou au sein du réseau d'aires marines protégées de la Méditerranée

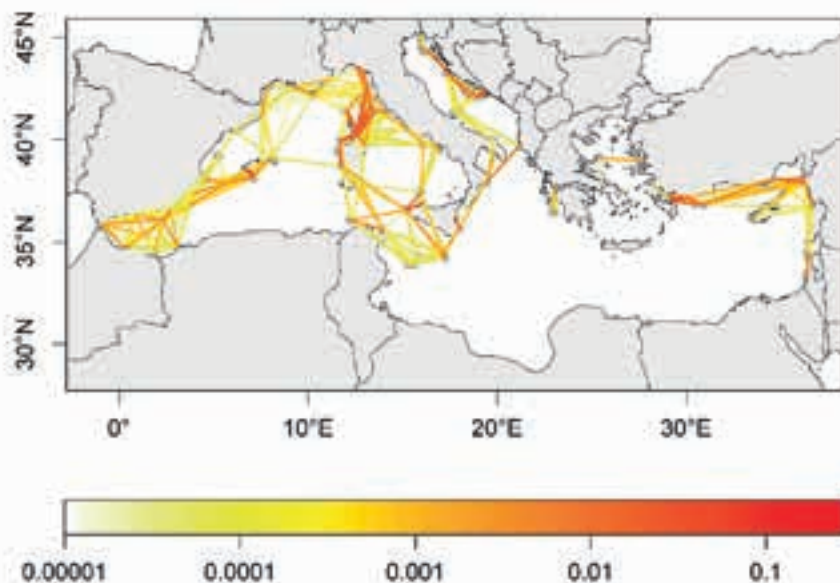
Les écosystèmes marins sont fragilisés par plusieurs facteurs liés aux activités humaines comme la pêche, la pollution, la dégradation de l'habitat et le changement climatique. L'une des solutions qui est proposée pour faire face à ces menaces est la mise en place de systèmes de gestion spatialisée des ressources, comme les réseaux d'aires marines protégées (AMP). Pour que ces systèmes fonctionnent réellement comme des réseaux, il est nécessaire qu'il y ait des échanges d'individus entre les différentes AMP. Pour les espèces marines dont les adultes sont sédentaires, ces échanges peuvent avoir lieu lors de la phase de dispersion des larves par les courants marins. La dispersion larvaire est un processus complexe au sens où il est « déterminé par de nombreux facteurs qui opèrent et interagissent à des échelles temporelles et spatiales multiples »*. La dispersion larvaire

du mérrou brun (*Epinephelus marginatus*) au sein du réseau d'AMP de Méditerranée a été étudiée dans le cadre du projet Fishconnect (2011-2014) financé par la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité et la Fondation Total. Nous avons appliqué le modèle individu-centré Ichthyop pour montrer que les distances parcourues par les larves de mérrou lors de leur phase de dispersion (120 km en moyenne) ne permettent pas aux AMP d'être connectées au-delà de leurs plus proches voisines, ce qui rend le fonctionnement en réseau peu efficace et fragile. Les modèles montrent aussi que, dans un contexte de réchauffement des eaux, les larves devraient croître plus rapidement et donc disperser moins longtemps.

* Pineda et al., 2009. *Population Ecology*. 51: 17-32.

Contacts : M. Andrello (UMR CEFE), marco.andrello@gmail.com,
D. Kaplan (UMR MARBEC), david.kaplan@ird.fr,
C. Lett (UMI UMMISCO), christophe.lett@ird.fr,
S. Manel (UMR CEFE), stephanie.manel@cefe.cnrs.fr,
D. Mouillot (UMR MARBEC), david.mouillot@univ-montp2.fr
Plus d'informations :
Projet Fishconnect :
<https://sites.google.com/site/projetfishconnect/>
Modèle Ichthyop : www.ichthyop.org

► *Probabilités simulées de connectivité (segments colorés) entre aires marines protégées (disques gris) du réseau de Méditerranée pour des larves de mérrou brun. D'après Andrello et al., 2013. PLoS ONE. 8. e68564. doi:10.1371/journal.pone.0068564*



Incertitudes et gestion des pêches : le cas du thon rouge

La surexploitation du stock de thon rouge de l'Atlantique et de Méditerranée a longtemps été considérée comme un archétype de la surpêche et de la mauvaise gestion de la part des organismes internationaux et des administrations nationales. Cette crise a notamment mis en évidence comment, les incertitudes inhérentes à tout avis scientifique, peuvent être utilisées par différents groupes de pression pour discréditer le diagnostic scientifique au détriment des intérêts économiques. Les évaluations scientifiques sont en effet toujours entachées d'incertitudes liées (i) à nos connaissances incomplètes sur les principaux facteurs contrôlant la dynamique des populations et (ii) aux variations naturelles de l'environnement qui les affectent, soit directement (au travers de la mortalité, croissance, migration) ou indirectement (au travers de la disponibilité en proie). Dans le cas des espèces marines se rajoutent la difficulté et le coût de l'échantillonnage qui limitent fortement nos capacités de suivis.

Cependant, cette crise a pris fin en 2009 après plus de 15 années de conflit entre exploitants, administrations, scientifiques et société civile, lorsque la Commission Internationale pour la Conservation des Thonidés*) a approuvé, sous la pression des organisations non gouvernementales et la prise de conscience de l'opinion publique, les recommandations scientifiques. Après deux décennies de déclin, le stock de thon rouge de l'Atlantique et de Méditerranée est reparti à la hausse, prouvant par là même que la gestion des pêches internationales est possible lorsqu'il y a une forte volonté politique. Cependant les incertitudes de l'avis scientifique ne permettent pas de quantifier précisément la vitesse et le degré de cette reconstitution du stock. Certaines de ces incertitudes étant intrinsèques aux populations, le nouveau défi de la communauté scientifique est donc d'élaborer des modèles de gestion dont les recommandations soient robustes aux incertitudes.

Contact : J.-M. Fromentin (UMR MARBEC), Jean.Marc.Fromentin@ifremer.fr

* www.iccat.int



► *Bateau de pêche transférant des thons rouges vers une cage flottante où les poissons seront engraisés pendant plusieurs mois. © Ifremer*

Développement de modèles « mécanistiquement riches » pour appréhender la complexité des relations populations-environnements

La gestion des rongeurs sauvages dans les zones agricoles nécessite une bonne compréhension du fonctionnement de ces populations. La géographie, l'écologie, la biologie, l'éthologie, etc., mettent chacune en évidence des facteurs explicatifs distincts des dynamiques observées qui sont tous légitimes. L'étude par simulation de l'effet conjoint et simultané de ces déterminants et de leur inter-dépendance peut apporter des clés pour une meilleure compréhension du fonctionnement de ces populations. L'approche dite des « modèles mécanistiquement riches » (DeAngelis et Mooij, 2003) vise à rendre compte de tels systèmes. Fondée sur l'utilisation de simulateurs individus centrés, elle cherche à intégrer la part la plus significative des processus connus. La figure ci-dessous présente un exemple de résultats produits par un tel modèle de populations de campagnols dans un paysage agricole variable. Les comportements saisonniers ou sexuels, la transmission génétique entre

individus simulés, les différents itinéraires techniques et la rotation des cultures ont été pris en compte. Chaque agent est semi-autonome et réalise son cycle de vie ainsi que diverses actions en fonction de son statut physiologique, des agents avec qui il a l'occasion d'interagir, de la nature changeante du terrain. Rendre compte de cette complexité permet aux simulateurs de souligner/révéler l'importance de facteurs singuliers liés à la complexité de la Nature représentée tels que la sensibilité à l'évolution des interactions dans le temps (cf. figure ci-dessous).

Contact : J. Le Fur (CBGP), lefur@ird.fr

Plus d'informations : DeAngelis D.L., Mooij W.M., 2003. In praise of mechanistically rich models. In: Canham, C.D., Cole, J.J., Lauenroth, W.K. (Eds.), Models in Ecosystem Science. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, pp. 63–82.



◀ Résultats de simulations par pas de temps quotidien pendant 5 ans d'une population de campagnol des champs (*Microtus arvalis*) dans un paysage fragmenté dynamique de Poitou-Charentes (France). Les trois cartes présentent des différences entre les distributions de rongeurs obtenues toutes choses égales par ailleurs pour trois populations initialement centrées dont les tailles (N_0) ne diffèrent que de 1 pour mille. Les simulations soulignent ici la sensibilité du système modélisé aux trajectoires individuelles et à l'histoire des interactions.

Réponses régionales de populations à la structure d'un paysage complexe

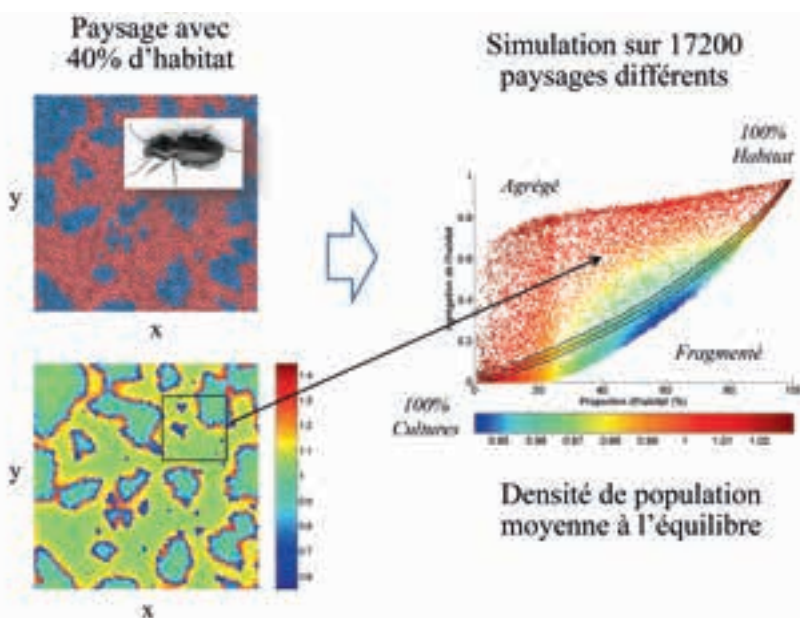
Dans le contexte environnemental actuel, il est important de comprendre l'impact des décisions de gestion des paysages agricoles sur les populations (patrimoniales, nuisibles ou plus communes) qu'ils accueillent. À cette fin, mais aussi pour disposer d'outils pour gérer ces systèmes agricoles complexes, nous avons développé un modèle numérique capable de déduire les dynamiques de populations à l'échelle régionale à partir des comportements (génériques) des espèces cibles à l'échelle locale de l'unité paysagère. Les spécialistes de ces questions écologiques spatiales dissocient les propriétés de composition (i.e. les attributs dominants des unités paysagères, généralement les proportions d'occupation du sol) et de configuration (i.e. les tailles et arrangements spatiaux des unités)

du paysage. Ces propriétés ne sont pas indépendantes. Il a longtemps été supposé que la composition paysagère dominait et guidait les dynamiques régionales des populations présentes. Cette hypothèse a été testée en modélisant, d'une part, une grande diversité de paysages aux compositions et configurations parfaitement contrôlées, et, d'autre part, plusieurs dynamiques de populations locales dans chaque unité paysagère. Le défi consistait à combiner les deux modèles pour réaliser le délicat changement d'échelle et déduire le comportement régional des populations par l'interaction spatiale et temporelle des sous-populations de chaque unité paysagère présente. De façon surprenante, ce modèle a permis de montrer que la réponse régionale (paysage) d'une population

pouvait être très différente de sa dynamique à fine échelle (unité), et pouvait dépendre autant de la configuration que de la composition du paysage. De plus, cette réponse régionale dépend fortement de l'échelle à laquelle on considère l'agrégation des dynamiques locales non-linéaires, et s'avère d'autant plus violente que l'échelle d'agrégation est proche de celle des unités paysagères. Nous espérons que de tels couplages de modèles feront école pour mieux comprendre les systèmes écologiques complexes dont nous dépendons.

Contact : C. Gaucherel (UMR AMAP), cedric.gaucherel@cirad.fr
Collaborateurs : P. Miguet (UMR AMAP/Centre d'Études Biologiques de Chizé-CBEC), V. Bretagnolle (CBEC)

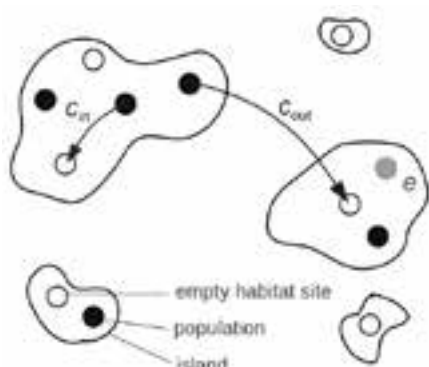
◀ Exemples de réponses fonctionnelles des populations modélisées. Partant d'un ensemble de paysages simulés (à gauche), on modélise également les dynamiques de populations d'insectes génériques au sein de chaque unité paysagère et du paysage dans son ensemble. Les migrations entre ces unités sont également prises en compte, selon la composition et la configuration du paysage (ici de 40 % et 0,6). La population ne parvient pas à s'installer complètement dans le paysage (à droite, faibles densités moyennes en couleurs froides) si les paysages sont plus fragmentés et avec des proportions d'habitats intermédiaires. © C. Gaucherel/Inra.



Dynamique de populations dans un habitat structuré

En écologie, les individus d'une même espèce forment des populations qui peuvent apparaître et disparaître au gré d'événements de colonisation et d'extinction. Ces événements dépendent de la configuration spatiale de l'environnement favorable à la survie des populations (habitat), et des capacités de déplacement et d'installation des espèces au sein de l'habitat. La dynamique de colonisation-extinction d'un ensemble de populations dans un habitat structuré est appréhendée par la théorie des métapopulations. Cette théorie permet d'étudier la densité et la structure des occurrences de populations à l'équilibre à partir d'équations dynamiques non linéaires. Le comportement spatio-temporel de ces équations est encore largement inconnu, bien que les besoins pratiques, pour la conservation des espèces, menacées notamment, soient importants. De plus en plus de données de distribution spatiale des espèces sont maintenant disponibles (par ex. l'Inventaire National du Patrimoine Naturel*). Dans le cadre d'une thèse, la dynamique stochastique de colonisation et d'extinction a été étudiée sur un ensemble d'îles d'habitat de taille variable.

Contacts : E. Pitard (UMR L2C), estelle.pitard@umontpellier.fr,
F. Munoz (UMR AMAP), fmunoz@univ-grenoble-alpes.fr
Plus d'informations : <http://amap.cirad.fr/fr/th3.php>
<https://sites.google.com/site/dybresnsc/>



◀ **Exemple de fragmentation de l'habitat forestier : d'un habitat spatialement homogène à des îles d'habitat de tailles variables.** Modélisation d'un habitat fragmenté constitué d'îles dans lesquelles se trouvent des sites occupés (cercles pleins) ou non (cercles vides) par des populations d'une espèce. De nouveaux sites peuvent être colonisés (flèches) par colonisation au sein des îles (taux c_{in}) ou entre les îles (taux c_{out}), et les populations peuvent s'éteindre (taux e , cercle gris). <http://forestsforwatersheds.org> Graphics courtesy of University of Connecticut Center for Land Use Education and Research

De nouveaux effets dynamiques ont été mis en évidence, notamment une dynamique d'extinction très lente lorsque la distribution de taille des îles est très hétérogène. Ce phénomène présente une grande importance pratique car des espèces semblant persister à court terme peuvent en réalité subir une dynamique d'extinction très lente. Les futures recherches s'articuleront autour de deux activités complémentaires :

- Étudier l'influence d'une variabilité temporelle de la qualité de l'habitat (variations périodiques ou épisodes catastrophiques ponctuels) sur les probabilités de colonisation et d'extinction des populations, déterminant la persistance ou l'extinction de l'espèce.
- Développer une méthodologie pour évaluer la pertinence des prédictions des modèles dans des cas concrets en accumulant les données spatio-temporelles : un cas d'étude actuel, important pour le littoral languedocien, est l'occupation des zostères dans les étangs traçable par imagerie satellitaire.

* Inventaire National du Patrimoine Naturel : <https://inpn.mnhn.fr/accueil/presentation-inpn>



▲ Cartographie de la présence des zostères dans l'étang de Thau après une campagne d'inventaire sur le terrain (document de janvier 2010 du Syndicat Mixte de l'Etang de Thau).

Influence des contextes socio-écologiques et de « l'exposome » sur les dynamiques et états de santé des populations humaines

L'approche holistique de la dynamique des populations humaines est un objectif intrinsèque de l'anthropologie biologique. Les interactions Hommes-Milieus sont, de longue date, une composante essentielle des recherches en ce domaine, comme en témoignent les programmes tels que *Man and Biosphère* (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, UNESCO). La variabilité biologique humaine est considérée selon deux perspectives. La première est celle de l'histoire démographique des populations incluant notamment taille de la population, choix du conjoint, fertilité, migrations, goulots d'étranglement associés à des guerres ou des maladies par exemple. La deuxième est celle de l'adaptation des populations à leurs environnements socio-écologiques et de leurs états de santé, axe

de recherche où l'anthropobiologie et l'épidémiologie se côtoient. À l'échelle des populations, la dynamique associée à ces adaptations peut se traduire par une (sous-) structuration des populations et/ou l'émergence d'adaptations locales. À l'échelle de l'individu, cette adaptation aux divers « stress » environnementaux, qui peut avoir un coût physiologique sur le long terme (charge allostatique), s'inscrit dans le concept plus large d'incorporation (« embodiment ») qui peut être défini comme « la façon dont nous incorporons, comme tout organisme vivant, littéralement, biologiquement, le monde dans lequel nous vivons, y compris nos circonstances sociétales et écologiques »*. Actuellement, évaluer l'impact des environnements ou de l'exposome sur le patrimoine biologique des individus et populations constitue un enjeu autant pour l'épidémiologie que pour l'anthropologie biologique. Les outils d'analyse de la complexité sont essentiels dès lors que les systèmes étudiés comprennent différentes échelles (de l'ADN aux métapopulations), l'influence de facteurs externes ou d'environnements socio-écologiques, une dynamique spatio-temporelle (qu'il s'agisse de l'histoire de vie des individus ou des populations), l'émergence de traits bio-culturels (pathologiques — cancer, obésité — ou non), et l'existence d'effets de seuil.

Contacts : M. Gibert (UMR AMIS), morgane.gibert@univ-tlse3.fr,
M. Kelly-Irving, michelle.kelly@inserm.fr, E. Rial-Sebbag, emmanuelle.rial@univ-tlse3.fr
et C. Delpierre (UMR LEASP), cyrille.delpierre@inserm.fr

* Krieger N., 2005. Embodiment: a conceptual glossary for epidemiology. *JECH*. 59(5): 350-5.



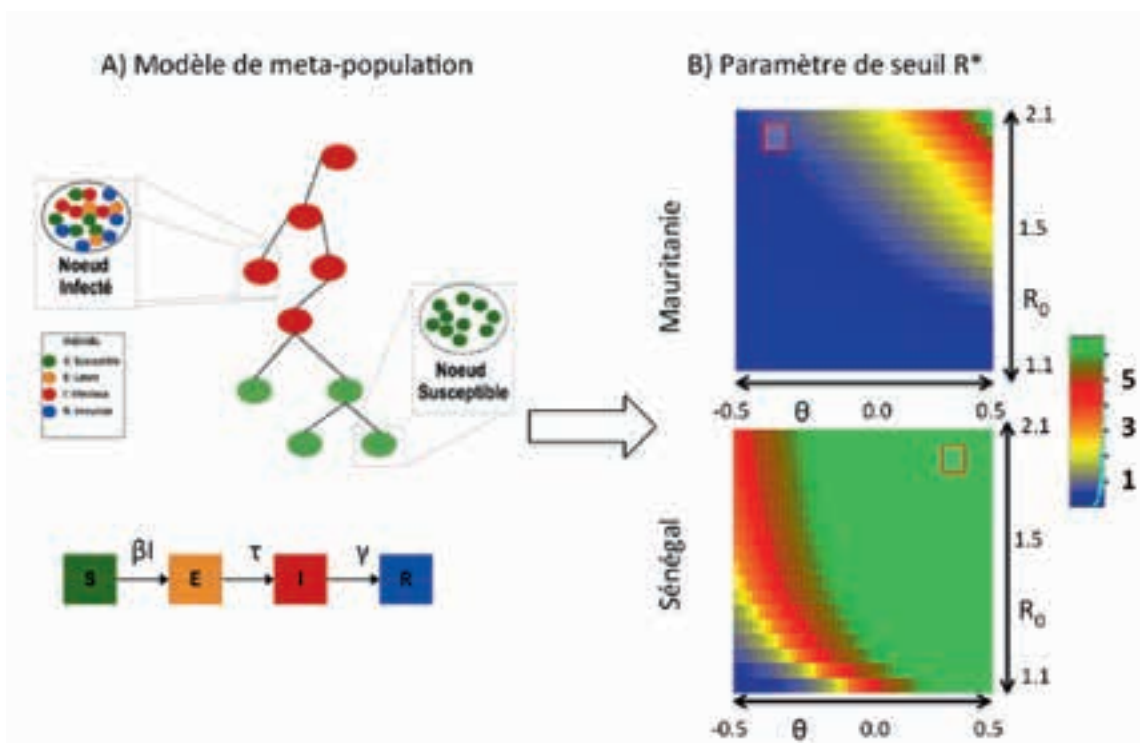
◀ **Illustration issue de pixabay sous © CC0 public domain.** Téléchargeable à : <https://pixabay.com/fr/district-de-sur-arqu%C3%A9-de-l-homme-291098>

Mobilité et transmission des maladies : le cas de la peste des petits ruminants (PPR)

Le risque de maladies épizootiques est fortement lié à la fréquence des mouvements transfrontaliers du bétail. La mobilité des éleveurs expose leurs animaux à de nouveaux agents pathogènes, tandis que leurs animaux peuvent à leur tour porter d'autres agents pathogènes. La PPR est une maladie transfrontalière affectant les petits ruminants en Afrique de l'Ouest. Selon l'âge et la race, l'infection peut être plus ou moins grave, et, dans sa forme la plus grave, la mortalité peut atteindre 90 %. Les modèles de métapopulation représentent une façon efficace de coupler les deux dynamiques de transmission de la maladie (échelle locale) et de mobilité des troupeaux (échelle globale) (cf. fig. A ci-dessous). Dans ce type de modèle, la population est divisée en sous-populations qui sont les nœuds du réseau de mobilité et les liens représentent les mouvements. Au niveau local, la transmission de la maladie est décrite par

un modèle à compartiments. Le modèle de métapopulation est décrit par un système d'équations différentielles, une pour chaque compartiment épidémiologique (Susceptible, Latent, Infectieux, Immunisé) de chaque sous-population prenant en compte la probabilité de transmission et les probabilités de mouvement dans les deux sens entre chaque couple de localités. Nous avons ainsi défini le paramètre de seuil R^* indiquant le risque de pandémie (>1), ou non (<1), qui dépend à la fois de la fraction d'animaux infectés déplacés, de la probabilité de déclencher une épidémie à niveau local (R_0) et de la structure du réseau. La Mauritanie et le Sénégal ont différents volumes de bétail commercialisé et les réseaux de mobilité changent autour de la Tabaski. Il s'avère ainsi que le risque d'une pandémie de la PPR diffère dans ces deux pays du fait des différences entre les réseaux de mobilité (cf. fig. B).

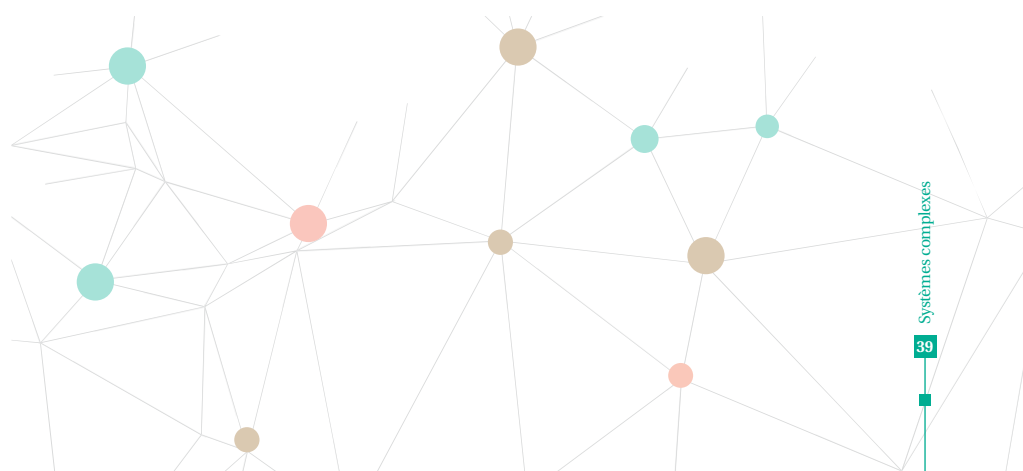
Contacts : A. Apolloni, andrea.apolloni@cirad.fr, C. Coste, caroline.coste@cirad.fr et R. Lancelot, renaud.lancelot@cirad.fr (UMR ASTRE)



▲ Représentation du modèle à métapopulation (A) et estimation du paramètre de seuil R^* (B).

(A) Le réseau de mobilité (en haut) et le modèle de transmission locale (en bas). Les compartiments correspondent à Susceptibles (S) qui n'ont pas encore été infectés par le virus ; Latents (E) qui ont été infectés mais ils ne peuvent pas encore transmettre la maladie; Infectieux (I) qui peuvent infecter les autres ; Immunisés (R) qui ont été infectés et qui ne peuvent plus infecter ou être réinfectés.

(B) La zone bleue indique la zone où $R^* < 1$. Les carrés indiquent les zones correspondant aux estimations réalisées à partir des données de sérologie et de mobilité recueillies dans les deux pays. Le paramètre θ est lié à la structure du réseau et sa distribution des mouvements.



Dynamique des écosystèmes

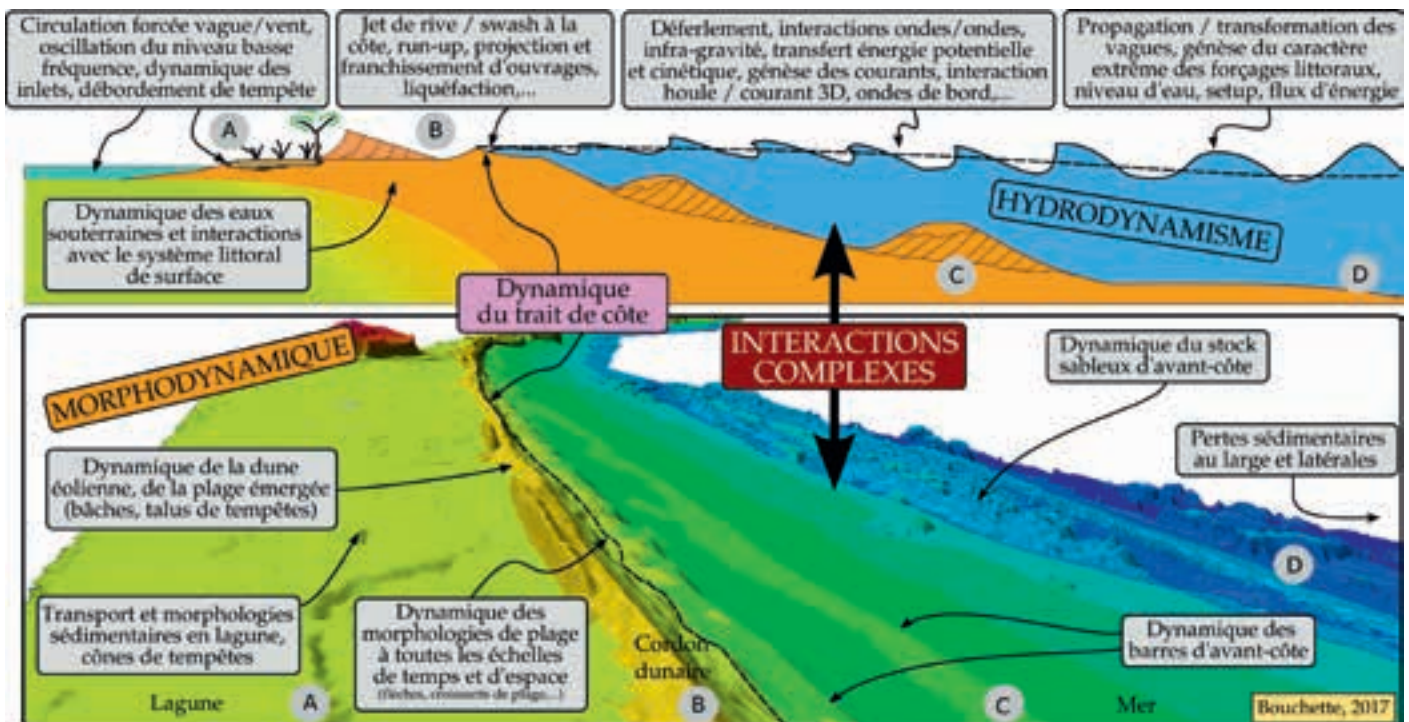
Interaction ondes de surface-courants-vents-bathymétrie : prédiction des phénomènes extrêmes dans les régions côtières

Les régions côtières sont le théâtre d'une intense activité économique où se développent l'habitat humain, la pêche, le commerce international, plusieurs secteurs de l'énergie, le tourisme, etc. Il est évident que la connaissance de l'état de la houle dans ces régions est un facteur de première importance pour le maintien et le développement de ces activités. Des vents très violents, associés à des courants littoraux et à la bathymétrie du lieu, peuvent produire une houle particulièrement forte conduisant à des phénomènes extrêmes dans les régions côtières, avec des impacts économiques et humains très graves. Il est donc très important de bien comprendre et de modéliser ces phénomènes complexes.

Nos recherches ont pour objectif principal la modélisation physico-mathématique de la croissance temporelle et spatiale de la houle côtière en présence de courants, de vents violents et à une profondeur finie et variable, et, *in fine*, la prédiction des scénarios extrêmes afin d'en atténuer les impacts. La modélisation théorique est basée sur des compétences déjà acquises grâce à l'apport expérimental du groupe de recherche GLADYS* (UMR GM). Ce groupe, en plus de posséder une énorme masse de données de terrain exploitables pour tester les modèles développés, procédera à la réalisation des nouvelles expériences requises par les modèles avant leur application sur le terrain. Ce projet est une collaboration entre les UMR L2C et GM, les universités de Marseille (Institut de Recherche sur les phénomènes hors équilibre) et de Toulon (Institut Méditerranéen d'Océanologie), l'Instituto de Física Teórica (Brésil) et l'université de Qom (Iran).

Contacts : M. Manna (UMR L2C), miguel.manna@umontpellier.fr, F. Bouchette (UMR GM), frederic.bouchette@gmail.com

* **Plus d'informations sur GLADYS :** www.gladys-littoral.org/en/about

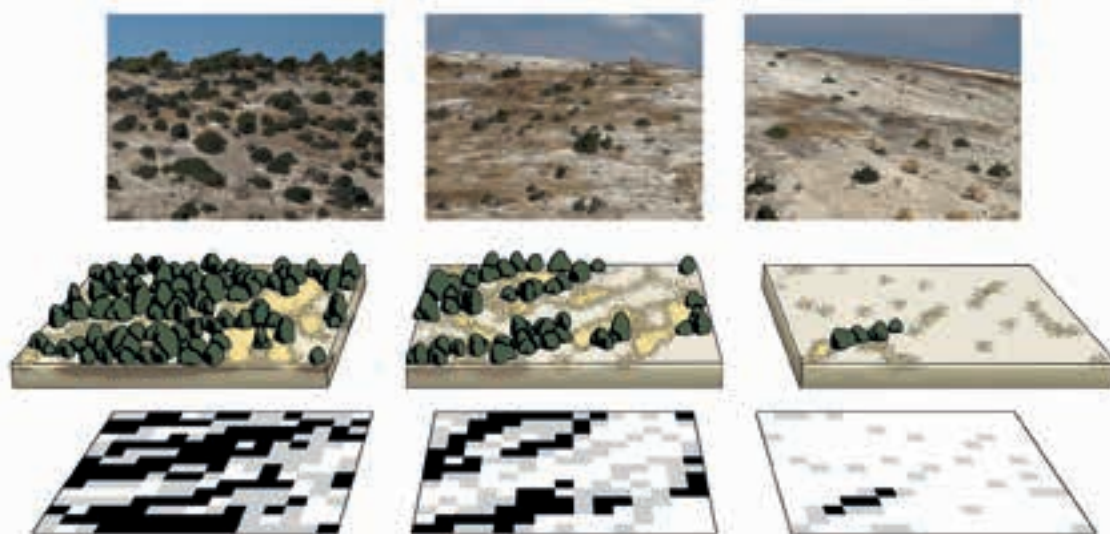


Écosystèmes et transitions catastrophiques

Dans le contexte actuel de changements globaux, anticiper la réponse des écosystèmes à des perturbations est un enjeu majeur. Pour ce faire, il est essentiel d'identifier les mécanismes de résilience des écosystèmes face aux changements environnementaux. Certains écosystèmes répondent de façon prévisible et graduelle à un changement progressif de condition environnementale (un changement climatique par exemple). D'autres répondent de façon abrupte, inattendue et souvent irréversible (« *catastrophic shift* »). Ces transitions abruptes — dont un exemple classique est la désertification des écosystèmes arides (cf. fig. ci-dessous) — peuvent avoir des conséquences écologiques et économiques dramatiques. Au sein de l'ISEM, nous développons des modèles mathématiques permettant d'étudier les mécanismes écologiques qui déterminent la résilience des écosystèmes. Dans les écosystèmes arides, par exemple, certaines plantes facilitent le recrutement et la croissance d'autres individus sous leur canopée. Cette facilitation crée une boucle de rétroaction entre les composants biotiques et abiotiques de l'écosystème, et est ainsi susceptible de conduire à des

transitions catastrophiques vers la désertification. La modélisation de ces mécanismes apporte des informations essentielles à la mise en place de stratégies de gestion et de restauration des écosystèmes. Ces modèles contribuent d'autre part à l'identification d'indicateurs de dégradation pouvant être utilisés comme des signaux d'alarme précoces. Un écosystème qui s'approche d'une transition indésirable présente-t-il des symptômes particuliers ? Nous développons, par exemple, des indicateurs de dégradation des écosystèmes méditerranéens dans le cadre du projet européen CASCADE, qui participe à la création d'outils statistiques visant à prévenir la dégradation irréversible de ces écosystèmes et la perte des services écologiques qu'ils procurent. Nos travaux de recherche sur la résilience des écosystèmes contribuent à améliorer notre compréhension de la persistance et de la stabilité des écosystèmes. Ils visent à fournir des outils permettant d'anticiper et de gérer les écosystèmes face aux défis environnementaux actuels et à venir.

Contact : S. Kéfi (UMR ISEM), sonia.kefi@umontpellier.fr
Plus d'informations sur le projet CASCADE : www.cascadis-project.eu



Formalisation d'un écosystème aride (haut) en automate cellulaire (bas).
© Florian Schneider

Modélisation impulsionnelle des interactions ligneux-herbacées en présence de feux : conséquences sur les dynamiques forêts-savanes

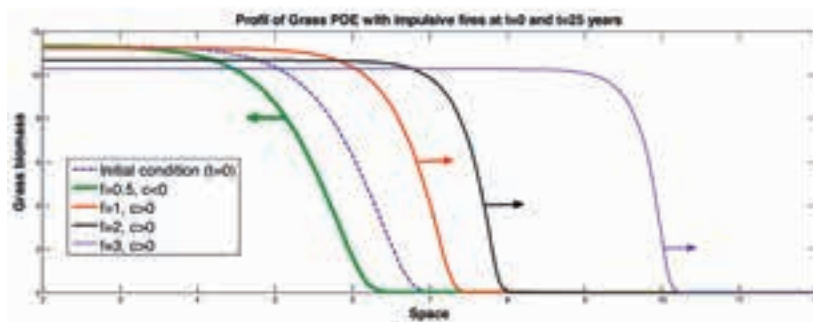
Le biome savane correspond à des physionomies de végétation variées observables le long des gradients climatiques menant de la forêt tropicale jusqu'aux déserts. Les dynamiques sous-jacentes résultent d'interactions entre plantes ligneuses et herbacées à la fois directes comme indirectes, au travers du feu ou d'autres perturbations. Les observations empiriques montrent que différentes physionomies, parfois très contrastées, peuvent coexister sous des précipitations similaires, ce qui suggère l'existence d'états alternatifs stables ou de transitions très longues. Ces questions fascinantes sont à l'origine de nombreux travaux de modélisation, mais aucun n'a débouché sur un système intégré de prédictions des états de la végétation et de leurs possibles transitions face au changement climatique et anthropique. Pour être utile, un tel système se doit d'être applicable à l'échelle de fractions de continents, y compris dans des territoires dénués de sites d'observation de longue durée, ce qui est le cas pour l'essentiel de l'Afrique.

Nos recherches visent à définir, étudier et tester des modèles « parcimonieux », capturant les processus essentiels, tout en se restreignant à un nombre limité de paramètres et autorisant une exploration mathématique approfondie des attendus. Le système « savane » est modélisé à partir d'un petit nombre de variables d'états, exprimant la biomasse des principales composantes de végétation : herbes, ligneux, en distinguant éventuellement les fractions de ces derniers sensibles ou non au feu. Le cadre des équations différentielles impulsionnelles permet de rendre compte du caractère ponctuel des feux. La dynamique spatiale est abordée au travers d'opérateurs de diffusion et/ou de noyaux traduisant la portée des influences facilitatrices ou inhibitrices de la végétation. Ceci permet d'évaluer dans quel sens les lisières forêt-savane peuvent évoluer en fonction de paramètres de forçage, comme la fréquence des feux (cf. fig. ci-dessous).

Contacts : P. Couteron, pierre.couteron@ird.fr,
Y. Dumont, yves.dumont@cirad.fr (UMR AMAP)



A. Variations du couvert végétal dans une mosaïque forêt-savane (Centre Cameroun, Google Earth ©). À noter la frange à ligneux de petite taille autour des ensembles de forêt mature, indice d'une extension progressive de ces dernières.



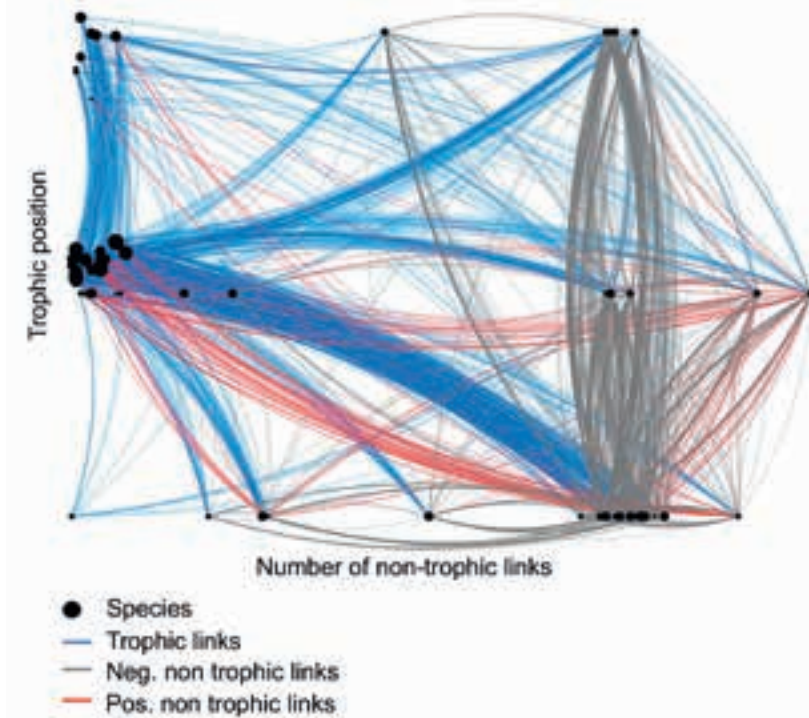
B. Prédiction de l'avancée ou du recul de la composante herbacée de la mosaïque en fonction de la fréquence des feux (modélisés sous forme impulsionnelle). En milieu subéquatorial, seule une fréquence de plus d'un feu par an semble pouvoir contenir la tendance actuelle à l'expansion de la forêt. D'après Yatat et al., 2017. Ecological Complexity.

Dynamique des communautés écologiques : de la recherche fondamentale aux applications pour les agroécosystèmes

Le fonctionnement d'un écosystème s'articule autour des relations de natures diverses entre les nombreuses espèces qui y vivent. Identifier ces interactions et le rôle qu'elles jouent dans le fonctionnement d'un écosystème est un des éléments clés pour progresser dans notre compréhension, et éventuellement prédiction, de la résilience des écosystèmes à des perturbations, comme le changement climatique ou l'exploitation par l'homme des ressources naturelles. Les réseaux d'interactions, qui recensent les espèces d'un écosystème et les interactions qui les lient, fournissent un cadre conceptuel et une boîte à outils extrêmement utiles pour décrire, visualiser et quantifier la complexité inhérente aux communautés écologiques. Par exemple, l'étude de ces réseaux pour l'ensemble des espèces présentes dans la zone de balancement des marées de la côte centrale du Chili (cf. fig. ci-dessous) a permis de quantifier le rôle des interactions trophiques et non-trophiques dans la résilience de ces écosystèmes.

Aujourd'hui, les approches et théories de l'écologie des communautés et des écosystèmes sont appliquées aux agroécosystèmes, systèmes *a priori* moins complexes mais pour lesquels on suspecte un fonctionnement similaire aux écosystèmes naturels. Les enjeux portés par l'agroécologie, notamment ceux associés à la durabilité et à la résilience de la production agricole face aux aléas climatiques, imposent une nouvelle vision de ces écosystèmes anthropisés. Piloter les interactions entre espèces devient essentiel. Par exemple, il a été montré que des prairies temporaires constituées expérimentalement d'une diversité plus élevée en espèces et variétés avaient une meilleure production et une plus grande résilience, sous l'hypothèse que les interactions entre celles-ci ont un rôle de régulation majeur. Construire ces réseaux d'interactions permet de proposer de nouveaux systèmes agricoles innovants et durables. La simplification des systèmes agronomiques n'est, de fait, plus la norme, et la gestion de leur complexité est de plus en plus appréhendée sous l'angle de l'écologie en général, et des réseaux d'interactions en particulier.

Contacts : S. Kéfi, sonia.kefi@umontpellier.fr (UMR ISEM), C. Violle, cyrille.violle@cefe.cnrs.fr (UMR CEFE)



◀ Réseau d'interaction entre les 106 espèces de la zone intertidale du centre du Chili. Les disques noirs représentent les espèces, les liens bleus les interactions trophiques, les liens gris les interactions non-trophiques négatives (de compétition et d'interférence) et les liens rouges les interactions non-trophiques positives (de facilitation). Les espèces sont verticalement agencées en fonction de leur niveau trophique (producteurs primaires en bas et prédateurs en haut) et horizontalement en fonction du nombre de liens non-trophiques dans lesquels elles sont impliquées. D'après Kéfi et al., 2016. PLOS Biol. 14, e1002527.

Modélisation des cycles couplés de l'eau, de l'énergie et de la végétation sur les surfaces continentales

La modélisation du fonctionnement biophysique des surfaces continentales est un outil privilégié pour les études de suivi, de gestion et de prévision, à horizons variés, des ressources hydriques et de la productivité végétale et agricole, sous contraintes climatique et anthropique. Elle prend en compte les processus nombreux et complexes pilotant et couplant les grands cycles de matières et d'énergie à la surface terrestre, déterminants pour le climat, les écosystèmes et les hydrosystèmes sur un territoire donné. Les interdépendances existantes entre ces processus conduisent à les intégrer de manière toujours plus complète dans les modèles du fonctionnement des surfaces. En s'appuyant sur son expertise acquise en régions tropicales ouest-africaines, l'équipe TECHS* de l'UMR HSM étudie la dynamique du cycle de l'eau sur ces régions, et les liens qu'elle entretient avec celles d'autres grands cycles environnementaux, en particulier de l'énergie et du carbone. L'équipe s'attache ainsi à comprendre les mécanismes d'échanges d'énergie et de masse (H₂O, CO₂) au continuum sol-végétation-atmosphère, contrôlés par le fonctionnement physique et écophysologique des espèces végétales

et du sol. La connaissance acquise est ensuite traduite sous forme de modèles à base physique, fonctionnant sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles allant du ponctuel (plante/arbre) au régional et de l'infra-journalier à l'inter-décennal. Deux voies de modélisation sont privilégiées, orientées vers le développement de modèles toujours plus complets en termes de processus, et/ou vers des stratégies de couplage entre différents types de modèles de surface existant et faisant référence en Afrique de l'Ouest. Les applications de tels outils ont permis d'établir des diagnostics fins des ressources hydrologiques et végétales en contexte sahélien agropastoral, ainsi que des projections d'évolution de ces mêmes ressources sous impacts de la variation des conditions climatiques et anthropiques, prenant en compte les contextes socio-économiques dans la définition de scénarios d'évolution et de gestion.

Contacts : J. Demarty, jerome.demarty@ird.fr, B. Cappelaere, bernard.cappelaere@ird.fr et C. Peugeot, christophe.peugeot@ird.fr (UMR HSM)

* Équipe « Transferts dans les écohydrosystèmes »

CERFACS : Couplage océan-atmosphère en Occitanie

Depuis 1990, l'équipe de modélisation du climat du CERFACS travaille sur le climat et les changements climatiques. Le CERFACS a développé au début des années 1990 un logiciel de couplage (OASIS) qui permet la synchronisation et l'harmonisation des échanges de grandeurs physiques (température de la surface de la mer, concentration de la glace de mer, vents de surface, courants océaniques, flux de chaleur radiatif et turbulent à la surface de l'océan, précipitations) entre les modèles numériques représentant les différentes composantes du système climatique terrestre : l'atmosphère, l'océan, la banquise et les surfaces continentales. Les chercheurs et ingénieurs du CERFACS ont ensuite réalisé les toutes premières simulations climatiques couplées de la communauté française, en partenariat avec Météo-France et l'Institut Paul-Simon Laplace. OASIS est maintenant utilisé dans de très nombreux laboratoires aussi bien en France qu'à l'international (Allemagne, Espagne, Angleterre, USA, Japon, Australie, Chine...). Il permet aujourd'hui le couplage des modèles climatiques les plus performants et la réalisation d'expériences climatiques longues sur les ordinateurs massivement parallèles (plusieurs centaines d'années de climat simulées en quelques semaines).



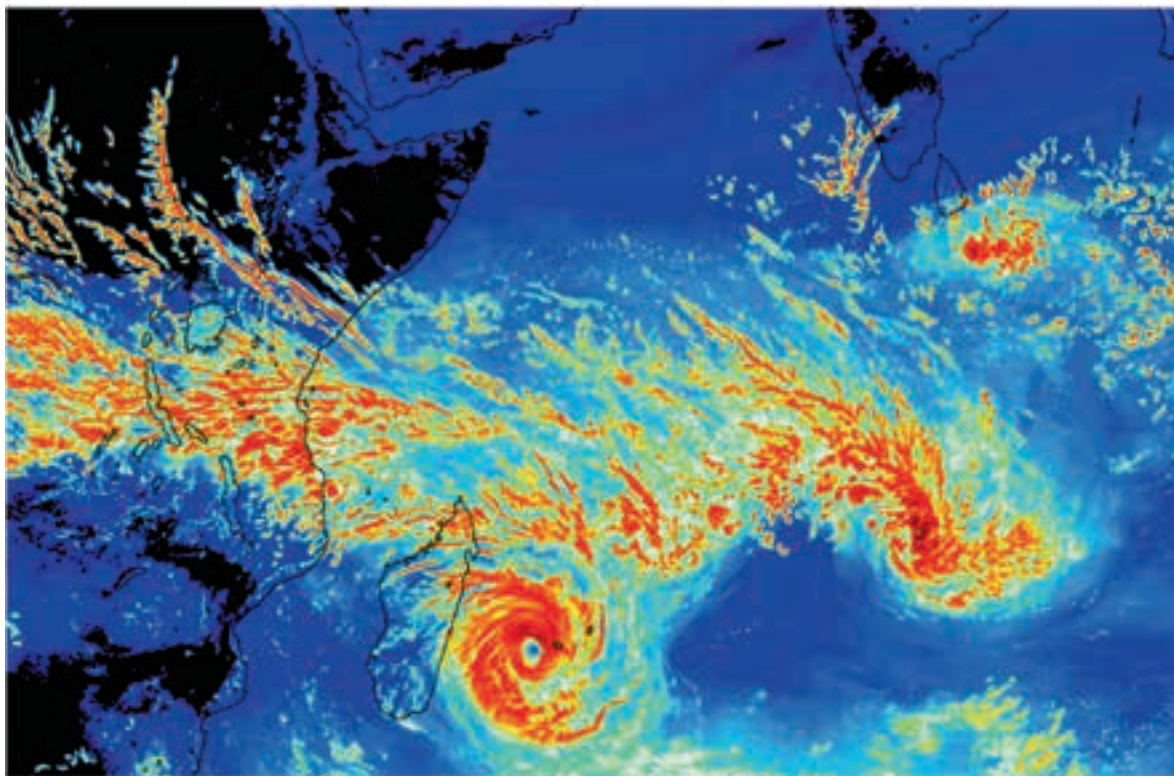
Ce travail pionnier sur le couplage des modèles climatiques nourrit de nombreux sujets de recherche qui sont abordés par l'étude conjointe des observations et de la modélisation numérique : compréhension des mécanismes de la variabilité climatique et de sa prévisibilité aux échelles interannuelle à décennale, impacts du changement climatique sur les événements extrêmes (tels que les vagues de chaleur, les crues et les sécheresses, les tempêtes), le climat de l'Europe et de l'Arctique, la circulation océanique et le rôle des petites échelles spatiales sur le climat (par exemple les tourbillons océaniques).

Contact : N. Monnier, monnier@cerfacs.fr

Plus d'informations :

<http://cerfacs.fr/>

<https://portal.enes.org/oasis/>



▲ Un cyclone modélisé par un modèle de climat à haute résolution.
© Cerfacs, Author provided

Agroécosystèmes, agrobiodiversités et environnement : systèmes façonnés par les interactions entre dynamiques biologiques et sociales

La grande variété d'agroécosystèmes 'traditionnels' dans le monde abrite une agrobiodiversité importante, issue de processus de domestication anciens et en cours, qui s'insère dans un contexte paysager. Le paysage, à son tour, est le produit, à une autre échelle, de croisements de processus écologiques et dynamiques environnementales, dont l'un des moteurs est l'histoire des civilisations humaines. Les pratiques humaines sont donc en interaction avec des dynamiques biologiques à plusieurs échelles emboîtées : intraspécifique, interspécifique et écosystémique. Les savoirs locaux intègrent ces différents niveaux dans les modalités de prise de décision. Décrypter comment ces savoirs opèrent est un enjeu important de recherche actuel.

Les agroécosystèmes peu transformés par la modernisation agricole, avec leur faible apport d'intrants, leurs habitats et milieux hétérogènes, constituent des modèles pour penser une agriculture durable intégrant des processus écosystémiques et sociaux. Économies agricole, forestière et de cueillette y coexistent, de même qu'une production destinée à la subsistance et au commerce de courte ou longue distance. Ces productions contribuent à une économie fondée sur la diversité, à différentes échelles spatiales, écologiques et sociales.

Ces agroécosystèmes peuvent, en outre, comprendre des espaces différenciés, plus ou moins transformés, allant d'espaces agricoles à des forêts domestiques, des prairies, des jachères ou des zones humides. Les démarches complémentaires proposées par divers laboratoires montpelliérains, dont les UMR CEFE, AGAP et ISEM, ainsi que le Groupement de recherche (GDR) Mosaïque, permettent de mieux appréhender, par des démarches interdisciplinaires, la genèse et l'évolution des agroécosystèmes et de leur agrobiodiversité, allant des dynamiques anciennes jusqu'aux situations contemporaines en intégrant ethnologie, ethnobiologie, archéobotanique, histoire, philosophie de l'environnement, *political ecology*, écologie évolutive et génétique des populations. Le GDR Mosaïque rassemble 14 UMR dont plusieurs laboratoires montpelliérains du CNRS, Cirad et IRD, afin de fédérer les travaux sur ces systèmes complexes. Les photos ci-dessous illustrent la grande diversité des systèmes socio-écologiques et des techniques paysannes rencontrées, qui constituent des systèmes complexes dont il est désormais essentiel d'en décrypter les modalités de fonctionnement.

Contacts : Y. Aumeeruddy-Thomas, yildiz.aumeeruddy-thomas@cefe.cnrs.fr et D. McKey, Doyle.mckey@cefe.cnrs.fr (UMR CEFE)

Plus d'informations : www.cefe.cnrs.fr/interactions-bioculturelles/gdr-3353-mosaïque



▲ **Plaine inondable de Bangweulu en Zambie.** Les agriculteurs construisent des champs surélevés pour fournir à leurs cultures des îlots de sol bien drainés (gauche). Dans la saison des hautes eaux, le bassin est inondé à une profondeur jusqu'à 1 m. Les agriculteurs transforment aussi en champs surélevés des termitières présentes dans ce même milieu, profitant du fait que les termites aient déjà fait le travail de la construction de ces îlots de fertilité bien drainés (droite). Comprendre le système agricole nécessite de comprendre les interactions entre « ingénieurs du sol » humains et non-humains. © Doyle McKey

▲ **Oliveraies alliant oléastres et oliviers, Rif, Nord du Maroc.** Ce système intègre l'hétérogénéité des porte-greffes d'origine sauvage (ou ayant poussé spontanément de graines) et des variétés cultivées à travers le greffage. Ce système paysan structure un agroécosystème riche en biodiversité interspécifique associée à une grande diversité de céréales, de légumineuses et d'espèces sauvages. © Yildiz Aumeeruddy-Thomas

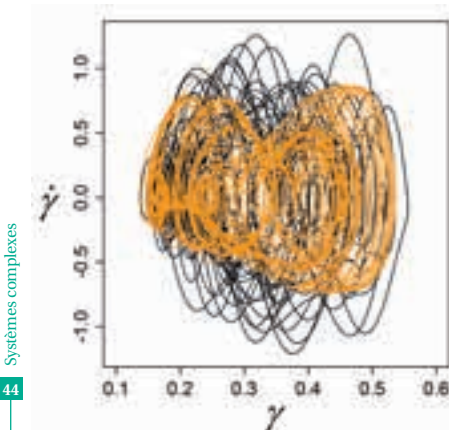
Extraire les équations des observations : application à la classification des couverts agricoles et à l'épidémiologie

Face à la complexité du monde réel, il peut être utile de disposer d'approches qui permettent d'extraire des lois directement à partir d'observations. C'est à ce niveau que les sciences du complexe peuvent apporter un renouveau et c'est l'ambition de la plateforme de modélisation GPoM* développée au CESBIO : obtenir des équations caractéristiques des lois qui gouvernent la dynamique en partant directement de séries de mesures observationnelles. L'idée n'est plus de construire des modèles à partir d'une connaissance *a priori*

mais d'extraire les équations des observations pour interpréter les comportements dynamiques ou les interactions entre variables observées. Appliqués au suivi par télédétection spatiale des cultures céréalières au Nord du Maroc, ces outils ont permis d'obtenir des modèles offrant une prévisibilité de 48 à 60 jours. La plupart d'entre eux présentent un comportement chaotique spécifique qui n'avait été préalablement rencontré que dans de très rares cas théoriques et qui révèle la forte sensibilité des cultures aux petites perturbations en même temps que la bonne adaptation des pratiques culturales au contexte semi-aride. Testés en Inde du Sud, ces outils ont permis de montrer qu'il était possible de distinguer les comportements dynamiques d'espèces culturales différentes, nous conduisant à proposer une nouvelle approche de classification. Ces outils, étant génériques, ont pu être appliqués à d'autres thématiques, notamment à l'épidémiologie. L'approche a ainsi permis d'obtenir un nouveau modèle reliant l'épidémie de peste bubonique de Bombay (1896-1911) aux épizooties chez les rats, et dont chaque terme a pu être interprété, ce qui était inattendu, ou encore d'obtenir un modèle pour l'épidémie de maladie à virus Ebola en Afrique de l'Ouest (2013-2016) mettant en évidence quatre types de situations épidémiologiques distinctes.

Contact : S. Mangiarotti (UMR CESBIO), sylvain.mangiarotti@ird.fr

***Plus d'informations sur GPoM (Generalized Polynomial Modelling) :** <https://cran.r-project.org/web/packages/GPoM>



◀ **Dynamique des cultures céréalières représentée par un portrait de phase (NDVI, dNDVI/dt) en région semi-aride.** Données AVHRR (en noir) et modèle (en orange). © Flavie Le Jean/CESBIO

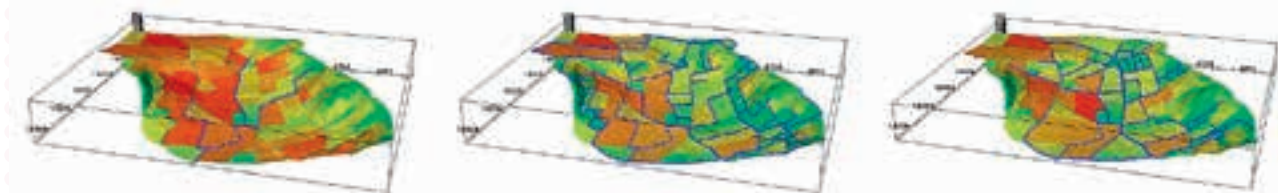
Plateforme OpenFLUID : modélisation spatialisée du fonctionnement des paysages complexes

La compréhension du fonctionnement des paysages cultivés est un enjeu important pour la gestion des milieux, et notamment pour inscrire l'agriculture dans une démarche de développement durable et de qualité. Ces paysages intègrent de nombreux objets géographiques et de nombreux processus biophysiques et sociaux-économiques. Ces processus ont des dynamiques à la fois distribuées dans l'espace et en fortes interactions, voire rétroactions, entre eux. Un système paysager est donc fortement complexe, et l'étude de tels systèmes sur des étendues spatiales et temporelles importantes se fait principalement au travers de la modélisation. Pour cela, il est indispensable de se doter d'outils permettant d'appréhender de telles caractéristiques. Depuis 2005, la plateforme OpenFLUID a ainsi été développée pour la modélisation spatialisée des paysages complexes.

OpenFLUID propose un formalisme de modélisation spatio-temporelle des paysages, basé sur (i) une représentation de l'organisation spatiale sous la forme de graphes d'espace et (ii) un système de couplage de modèles dynamiques, branchés à la demande

dans la plateforme. La représentation sous forme de graphe d'espace, obtenue à partir de données géographiques, fait figurer les objets du paysage (nœuds du graphe : parcelle, tronçon de rivière, tronçon de route, souterrain, atmosphère...) et les relations entre ces objets (arcs du graphe qui relient les nœuds). Les modèles couplés s'appuient sur ce graphe d'espace pour simuler la dynamique spatio-temporelle du paysage. Avec les fonctionnalités avancées de graphes imbriqués et de couplage à pas de temps variables, OpenFLUID permet d'aborder des approches de modélisation multi-échelle. La plateforme OpenFLUID est un environnement logiciel complet bâti autour du framework de modélisation et simulation : développement, capitalisation et partage de modèles, préparation des applications, exécution des simulations et exploitation des résultats. En outre, la plateforme propose différentes interconnexions avec des outils tiers, notamment avec l'environnement R pour aborder, par exemple, des travaux en multi-simulation.

Contact : J.-C. Fabre (UMR LISAH), jean-christophe.fabre@inra.fr
Plus d'informations : www.openfluid-project.org



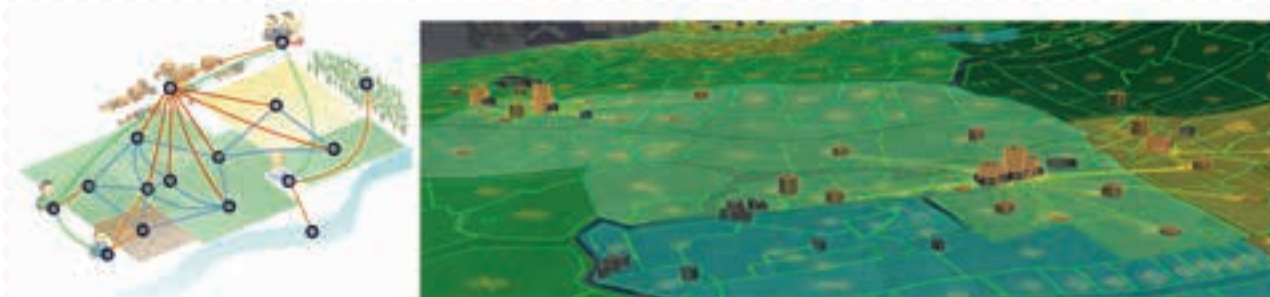
▲ Exemple de multi-simulation pour déterminer l'optimum de densité et d'organisation spatiale d'un réseau hydrographique pour limiter les risques d'érosion sur les parcelles agricoles connectées à ce réseau.
© F. Levavasseur (résultats des simulations) / J.C. Fabre (mise en forme graphique)

Plateforme de modélisation Ocelet : simuler les dynamiques spatiales par les graphes d'interaction

La plateforme Ocelet est utilisée dans différentes disciplines pour construire des modèles de simulation servant à étudier des phénomènes qui s'expriment spatialement dans les territoires. Parmi les outils et approches ayant cette finalité, Ocelet se distingue par le concept de base proposé pour construire les modèles : le graphe d'interaction. Le graphe désigne simplement un ensemble de nœuds dont certains sont reliés par des arcs. Le graphe d'interaction est ici défini comme un graphe enrichi de la possibilité donnée aux arcs de porter des fonctions d'interactions. Ainsi, tout système à modéliser est vu comme un ensemble d'entités interconnectées ; l'exécution des fonctions d'interactions entraîne des changements dans les entités reliées et fait évoluer le système. Il est à noter que ce même concept permet de représenter de manière unifiée les entités spatiales en formats vecteur et raster, et de les utiliser ensemble dans les modèles.

Contacts : P. Degenne, pascal.degenne@cirad.fr et
D. Lo Seen, danny.lo_seen@cirad.fr (UMR TETIS)
Plus d'informations : www.ocelet.fr

Ocelet se présente comme un environnement logiciel et un langage métier dédié qui propose un nombre restreint de concepts formellement définis, essentiels pour le modélisateur. L'interface utilisateur regroupe les différentes fonctions de création et de maintenance de modèles, d'édition de source Ocelet, de compilation, de lancement de simulation, d'affichage ou d'exportation de résultats de simulations, notamment sous forme de cartes animées. Le langage métier permet de modéliser avec une grande liberté d'expression une portion de territoire et les processus qui s'y manifestent dans le but de simuler son évolution dans le temps. Des modèles ont été réalisés dans divers domaines comme la dynamique côtière d'écosystèmes de mangroves, la dynamique des populations de moustique pour l'aide à la lutte anti-vectorielle, la simulation prospective de scénarios d'étalement urbain, et la dynamique agraire d'une zone cotonnière au Burkina Faso. Le logiciel et le manuel d'utilisation sont disponibles en ligne sur le site internet d'Ocelet.



▲ Graphes d'interaction et modélisation de transferts de biomasses agricoles à La Réunion. P. Degenne, 2018, Projet GABiR.

Gestion des territoires

Modéliser les sociétés et leurs territoires : de l'importance des sciences sociales

Une plateforme multi-agent est une description simplifiée de la réalité construite sur la base d'une approche systémique dont l'essor est annoncé depuis une vingtaine d'années. Elle consiste en la formalisation d'un nombre important d'entités appelées agents, chacune représentant une unité sociale, individu, famille ou autre collectivité, avec un certain degré d'autonomie et dans un contexte donné. Ce dernier peut être l'ensemble des connexions reliant ces agents ou un décor biophysique ou encore une combinaison des deux. L'ensemble des interactions entre ces entités crée des dynamiques d'émergence et constitue le principal apport de ces modèles : faire apparaître des dynamiques sociales non-linéaires, pas forcément prévisibles, et rendre compte de leurs poids en termes d'impacts sur les contextes environnemental et social. Un usage majeur de ces modèles dans le domaine agro-environnemental est de traduire l'impact des activités humaines sur un territoire. Ici apparaît l'importance de distinguer objet et sujet de recherche. Si les sujets de recherche s'affichent comme étudiant une dynamique

humaine et ses impacts sont courants, l'objet de recherche est souvent le territoire entraînant un biais fondamental : celui de n'intégrer que les dynamiques humaines directement reliées au territoire. Or, de nombreuses dynamiques sociales n'ont pas pour origine le territoire local. Ainsi, les dynamiques démographiques, et, en particulier, de reprise d'exploitations en France, sont majeures. Celles-ci sont déterminantes dans l'occupation du territoire à l'horizon d'une génération mais aussi dans les stratégies agricoles et environnementales de la génération présente : on ne réinvestit pas quand on sait que l'exploitation ne sera pas reprise. Plus globalement, si l'intégration des dynamiques environnementales est en bonne voie dans les modèles multi-agents par l'existence d'une combinaison explicite et formalisée via les outils d'information géographique grâce à, par exemple, des plateformes dédiées comme GAMA (cf. p. 50), l'intégration des sciences humaines, au-delà de l'économie, reste à faire.

Contacts : M. Saqalli (UMR GEODE), Mehdi.saqalli@univ-tlse2.fr, M. Belém (WASCAL), belem.m@wascal.org, B. Gaudou (Équipe SMAC/IRIT), benoit.gaudou@ut-capitole.fr

Collaborateurs : M. Saenz (Programa de Manejo del Agua y del Suelo/Universidad de Cuenca, Équateur), M. Paegelow & N. Maestriperieri (UMR GEODE)

Croyances



Le point de vue des acteurs

Désirs

Intentions

Scénarios



Le point de vue des experts

▲ *Utilisation des outils d'enquête socio-économique qualitative pour intégrer les perceptions des acteurs locaux (perceptions spatiales, des ressources, des risques, etc.) dans la définition des croyances des agents à modéliser, selon des architectures de type Belief-Desires-Intentions (BDI) et des outils de formalisation de scénarios par ateliers avec des experts des dynamiques et/ou du territoire envisagés dans le modèle. © GEODE*

Évaluer par modélisation des stratégies de réduction des usages d'herbicides dans les bassins versants viticoles

La réduction des risques de contamination des eaux de surface et souterraines par les herbicides est un enjeu important en région viticole méditerranéenne du fait de risques élevés liés à l'importance des écoulements de surface et aux usages d'herbicides. Le projet SP3A a développé une méthodologie d'évaluation de stratégies prospectives



d'entretien du sol choisies par un groupe d'experts pour réduire le ruissellement polluant par herbicides tout en préservant la production. La méthodologie est basée sur une chaîne de modèles, développée sur les plateformes de modélisation OpenFLUID (cf. p. 45) et DIESE*, qui permet de simuler dans différents contextes climatiques, les itinéraires techniques d'entretien du sol, les dynamiques d'états de surface du sol, les flux de ruissellement polluant, les stress hydrique et azoté subis par la vigne et leurs impacts sur les

rendements en raisin. La modélisation de nature pluridisciplinaire allie des représentations des chantiers de travail d'une exploitation viticole, des flux hydrologiques à l'échelle du bassin versant et de la croissance de la vigne. Elle fournit une base de discussion quantifiée pour concevoir le changement de pratiques. Dans l'exemple spécifique traité, l'évaluation par modèle a convergé avec l'analyse à dire des viticulteurs sur la nécessité d'introduire de la flexibilité dans la définition des stratégies de réduction des usages d'herbicide. En effet, elle montre qu'une certaine souplesse est (i) nécessaire pour satisfaire les objectifs de production et (ii) possible sans élever de manière forte le niveau de contamination des eaux de ruissellement. Elle indique toutefois aussi qu'à terme l'abandon total des herbicides est à rechercher pour garantir la qualité des masses d'eau issues du ruissellement. L'approche de modélisation n'est bien sûr pas suffisante à elle seule pour déterminer des stratégies répondant aux objectifs productifs et environnementaux et adaptées aux conditions locales d'un territoire. Mais elle peut utilement s'inscrire dans une démarche de co-construction entre les acteurs.

Contacts : A. Biarnès, anne.biarnes@ird.fr et M. Voltz, marc.voltz@inra.fr (UMR LISAH)

Collaborateurs : P. Andrieux (UMR LISAH), J.M. Barbier (UR Agrosystèmes tropicaux, ASTRO), A. Bonnefoy (UMR LISAH), C. Compagnone (Centre d'Économie et de Sociologie Appliquées à l'Agriculture et aux Espaces Ruraux, UMR CEASER), X. Delpuech (Institut Français de la Vigne et du Vin, IFV), C. Gary & A. Metay (UMR SYSTEM), J.-P. Rellier (UR Inra-MIAT)

* Plus d'informations sur la plateforme DIESE (Discrete Event Simulation Environment) : <https://carlit.toulouse.inra.fr/diese>

Les paysages à buttes dans les savanes inondables d’Afrique et d’Amérique du Sud

Les « paysages à buttes » sont caractérisés par des îlots de terre exondés, régulièrement espacés, dans une matrice inondable. Le sol bien drainé étant une ressource clé, ces îlots profitent à ceux qui les construisent : les hommes (champs agricoles surélevés) et les « ingénieurs du sol » (vers de terre, termites...). Quelle que soit leur origine, l'apparition de ces paysages transforme le fonctionnement de l'écosystème. Leur complexité a plusieurs sources.

Premièrement, ils sont formés par des interactions entre processus sociaux ou culturels et processus naturels, nécessitant une approche transdisciplinaire.

Deuxièmement, chaque processus produit un type d'ordre spatial.

Cet ordre peut être planifié (imposé par un agriculteur construisant une parcelle de champs surélevés) ou peut émerger soit spontanément des actions collectives d'individus d'une société (agencement de structures édifiées par différents agriculteurs), soit de processus naturels d'auto-organisation (mécanismes de Turing — facilitation à courte échelle, inhibition à plus grande échelle — dus aux actions de la faune du sol). Que l'ordre émergent soit spontané (processus sociaux) ou résulte d'auto-organisation (processus biologique), la dynamique est dominée par des rétroactions et est donc fortement non-linéaire.

Troisièmement, ces mécanismes générateurs d'ordre interagissent, créant de nouvelles rétroactions. Dans les savanes côtières de Guyane, les vestiges de champs surélevés abandonnés sont maintenus contre l'érosion par des ingénieurs du sol. Cependant, ces derniers seraient incapables

de construire des buttes. La construction, puis l'abandon, des champs surélevés a poussé le système vers un état alternatif stable. Ailleurs, dans les savanes plus grandes et anciennes des Llanos de l'Orénoque, des ingénieurs du sol ont eu suffisamment de temps et d'espace pour développer des adaptations spécifiques à l'inondation, construisant leurs propres buttes.

Quatrièmement, ces paysages sont des palimpsestes, où des processus sociaux et biologiques ont agi à différents moments et continuent à interagir aujourd'hui, créant des paysages ayant chacun sa propre histoire et un héritage écologique unique. Aborder de tels systèmes complexes a nécessité des collaborations entre chercheurs de nombreuses disciplines : écologues, pédologues, géographes, archéologues, archéobotanistes, agronomes, ethnobiologistes et spécialistes en télédétection.

Contact : D. McKey (UMR CEFE), doyle.mckey@cefe.cnrs.fr

Plus d'informations :

<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0154269>

<http://www.pnas.org/content/107/17/7823.short>

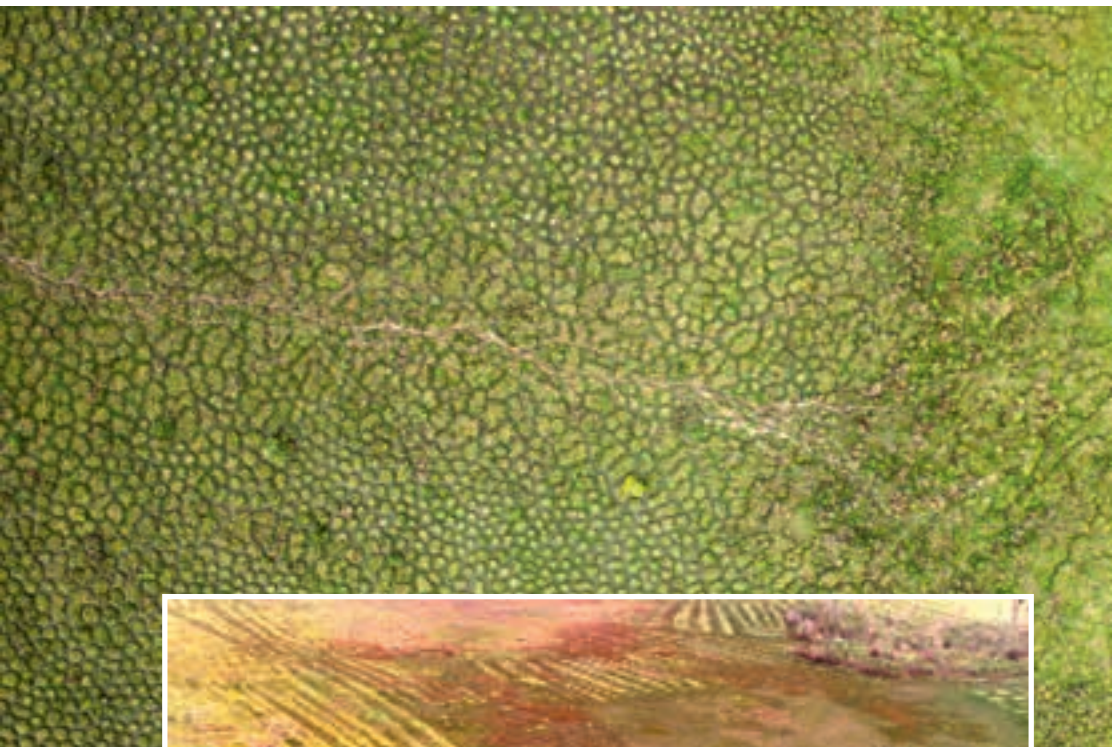
<https://ethnoecologie.revues.org/2193>

<https://www.youtube.com/watch?v=7K58jjEmeHo>

<https://www.youtube.com/watch?v=PXeJcWcfS9I>

<https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/e01a65c5769726d35c4f005a13c46502>

Collaborations : avec les UMR Eco&Sols et TETIS, les sociétés Avion Jaune et YellowScan et d'autres laboratoires en France et à l'étranger (Royaume-Uni, Espagne, USA, Luxembourg, Bolivie, Colombie, République du Congo, Zambie).



◀ **Les surales, un paysage à buttes d'origine naturelle.** Photo aérienne d'un paysage surales dans les Llanos de l'Orénoque en Colombie, prise avec le drone Pixy™. Les buttes des surales sont faites par des vers de terre. La forme et la taille des buttes varient le long de gradients écologiques (ici, des petites variations en altitude) comme prédit par la théorie de l'auto-organisation spatiale. © Delphine Renard/CEFE

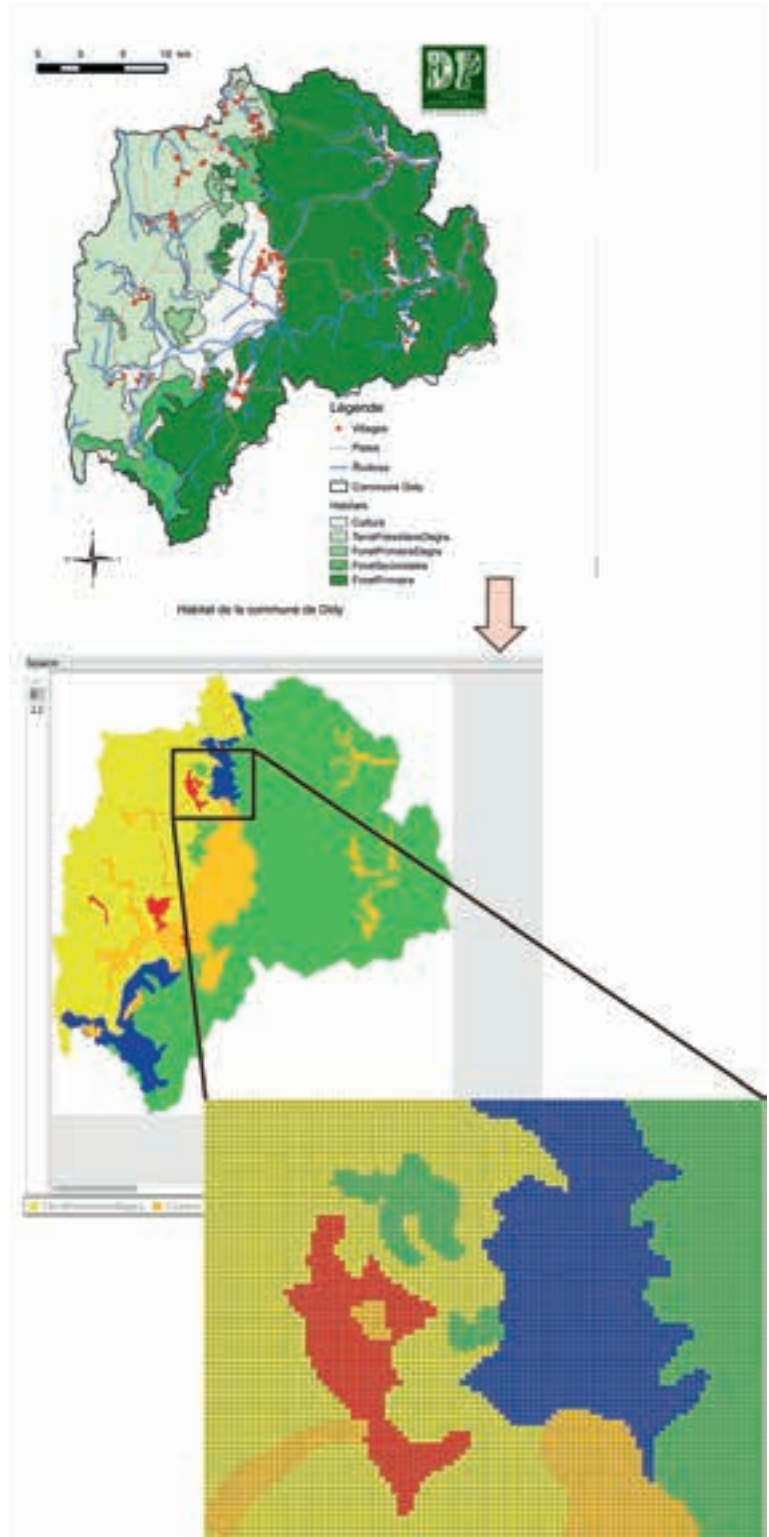


◀ **Photo aérienne de vestiges de champs surélevés précolombiens dans les savanes côtières de la Guyane.** Ces buttes, construites par les hommes et abandonnées depuis au moins 500 ans, ont été remaniées par les vers de terre, les insectes sociaux et les racines des végétaux. © Stéphen Rostain/UMR Archéologie des Amériques

Impact de plans de gestion décentralisée des forêts sur la durabilité des socio-écosystèmes dans un contexte de pluralisme juridique

Dans un contexte de disparition rapide de la forêt primaire à Madagascar, l'État a mis en place une gestion décentralisée des ressources naturelles en général, et forestières en particulier, dévolues aux communautés locales (COBAs). Celles-ci sont donc en charge de proposer des plans de gestion (zonages, quotas, permis, etc.) assurant la durabilité écologique, économique et sociale de leur territoire. Afin d'apprécier l'impact de ces plans sur la durabilité des socio-écosystèmes, un protocole de suivi-évaluation appliqué sur 18 COBAs de la commune de Didy (Région Alaotra Mangoro), ainsi qu'un modèle de simulation ont été développés conjointement. L'évaluation des impacts repose sur une compréhension à la fois des dynamiques écologiques (notamment les dynamiques de population et d'occupation des sols), des dynamiques socio-économiques (notamment la distribution et l'affectation des revenus issus de l'exploitation des ressources forestières et des autres activités génératrices de revenus) et des dynamiques juridico-institutionnelles (respect des droits, obligations des COBAs et engagement des parties prenantes à la gestion décentralisée). Ainsi, nombreuses sont les disciplines nécessaires à la compréhension intégrée du socio-écosystème que constitue le territoire de la communauté locale concernée. Par ailleurs, l'effectivité des plans de gestion sur les comportements des populations repose sur l'exploitation opportuniste d'un ensemble de régulations issues du droit de l'État, de la coutume et de la pratique. L'ensemble des disciplines convoquées ainsi que des régulations à différents niveaux (administration des parcs et des forêts, autorités coutumières, etc.) constituent autant de points de vue sur le socio-écosystème qu'il est nécessaire d'identifier, formaliser et articuler dans un modèle de simulation intégré. Plusieurs scénarios ont été simulés afin d'apprécier les avantages et désavantages respectifs de différents modèles de gestion, de la gestion traditionnelle à la gestion décentralisée à vocation de protection et/ou d'exploitation en passant par les concessions.

Contacts : S.Aubert, sigrid.aubert@cirad.fr et
J.-P. Müller, jean-pierre.muller@cirad.fr (UPR Green)
Plus d'informations : projet COGESFOR, www.cogesformada.org



▲ De la cartographie d'une commune à la simulation des pratiques et de leurs régulations.

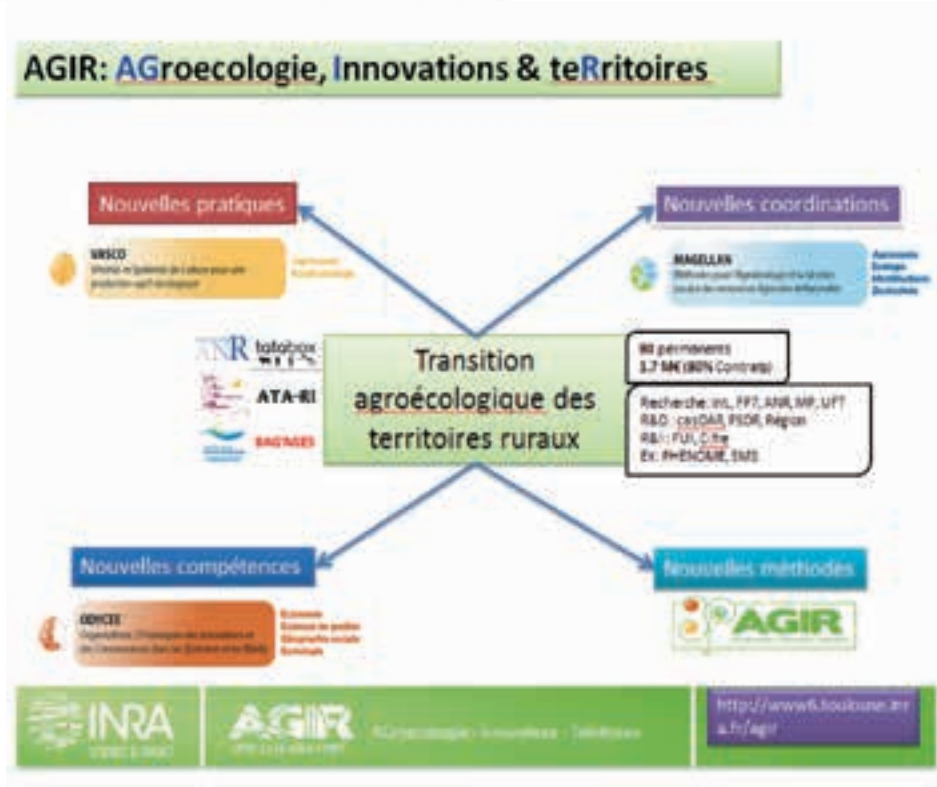
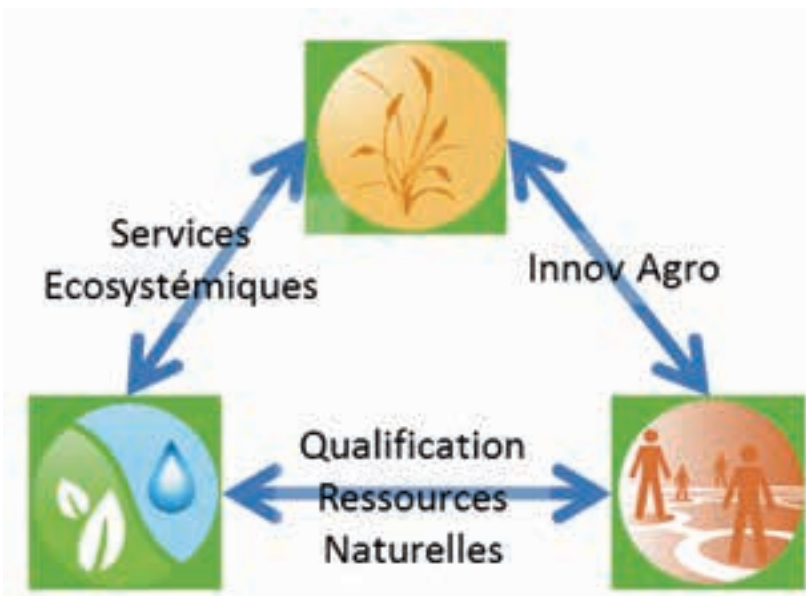
Étudier la complexité des systèmes agro-écologiques et des processus de transition

Le projet scientifique interdisciplinaire de l'UMR AGIR vise la production de connaissances, méthodes et dispositifs, pour développer des agroécosystèmes diversifiés et adaptés aux enjeux globaux, en s'appuyant sur des innovations et des changements dans les modes de gestion des ressources naturelles. Par agroécologie, nous entendons une agriculture mobilisant les leviers des services écosystémiques grâce aux régulations biologiques, pour réduire l'utilisation d'intrants de synthèse. Développer une telle agroécologie et suivre les transitions vers de nouveaux systèmes au niveau des territoires, nécessitent des connaissances sur les processus biophysiques et écologiques, les jeux d'acteurs, et les agroécosystèmes, ainsi qu'une analyse des changements (techniques, organisationnels et institutionnels) aux niveaux des systèmes de production, des filières et des territoires.

Les agroécosystèmes territoriaux peuvent être vus comme des systèmes complexes adaptatifs pilotés, mobilisant des ressources naturelles (e.g. biodiversité, eau), structurelles (e.g. exploitations agricoles, coopératives),

et cognitives (e.g. les groupements d'agriculteurs). Ces systèmes sont soumis à de nombreuses incertitudes (e.g. climat, prix, réglementation) obligeant les acteurs à faire des choix plus ou moins risqués mais, surtout, à avoir une gestion adaptative de leur système. Alors que certains modèles de changement sont essentiellement basés sur des innovations ponctuelles ou incrémentales, d'autres nécessitent de repenser de manière plus radicale les systèmes agricoles et alimentaires. Ils peuvent nécessiter une recombinaison importante des formes de coordination entre acteurs. L'incomplétude des connaissances lors de la mise en œuvre de ces pratiques conduit à de nouvelles formes de rationalité pour les acteurs des filières agricoles. Cette incomplétude peut porter sur les processus écologiques, sur la difficulté de prédire les effets des pratiques ou sur les relations entre acteurs. La prise en compte de ces incertitudes nécessite de repenser la contribution des chercheurs aux innovations. Traiter de la « forte écologisation » de l'agriculture nécessite une plus forte intégration des liens existant et à créer entre les systèmes socio-écologiques et les systèmes sociotechniques.

Contacts : J.-E. Bergez, jacques-eric.bergez@inra.fr et D. Galliano, danielle.galliano@inra.fr (UMR AGIR)



Le modèle PASHAMAMA-MONOIL : impacts des activités pétrolières en Équateur

Depuis les années 1970, la partie nord de l'Orient (Amazonie équatorienne) est colonisée du fait de l'effet conjoint d'une forte incitation étatique à cette colonisation par les habitants des Andes et de l'exploitation pétrolière, ce qui est à l'origine de nouvelles routes et de pollutions. Le modèle PASHAMAMA-MONOIL cherche à évaluer les impacts combinés de ces dynamiques à la fois sur l'environnement et sur la population humaine en reproduisant la poussée démographique, principalement par immigration, et les expositions aux pollutions pétrolières au cours du temps. Ce modèle, construit sur la plateforme de modélisation GAMA (cf. ci-dessous), est à base d'agents et spatialisé. Il sert de base pour une étude rétro-prospective :

- rétrospective des dynamiques passées (démographiques, environnementales et de contamination) ;
- prospective (scénarios) selon les politiques futures, les prix du pétrole ou des produits agricoles, la démographie, etc.

Le modèle a été développé par les UMR IRIT et GEODE ainsi que leurs partenaires*, sur trois zones d'étude : Pacayacu, Joya de Los Sachas et Dayuma. Il intègre deux dynamiques principales :

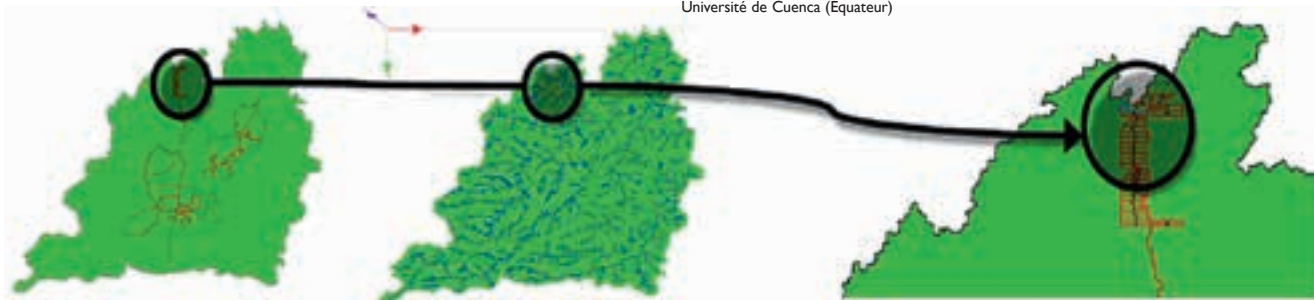
- Les compagnies pétrolières construisent des routes, des oléoducs et autres infrastructures. Celles-ci occasionnent des fuites, des ruptures et autres accidents qui produisent une pollution pétrolière locale se déversant dans les cours d'eau pour ensuite affecter les sols alentours, les exploitations agricoles et les personnes.

- Des colons, venus des Andes, de la Côte mais aussi du sud de l'Amazonie, s'installent et prennent des concessions agricoles qu'ils choisissent aussi proches des routes que possible et y produisent des cultures vivrières et commerciales.

Les données spatiales, infrastructures pétrolières et routes, proviennent du ministère équatorien de l'Environnement ainsi que des gouvernements locaux et les données démographiques de l'Institut National du Recensement équatorien. La typologie des agriculteurs se base sur des enquêtes agricoles, anthropologiques et économiques réalisées de 2014 à 2016.

Contacts : B. Gaudou (UMR IRIT), benoit.gaudou@ut-capitole.fr, M. Belém (WASCAL), mahamadou.belem@gmail.com, M. Saenz (Université de Cuenca), msaenz47@gmail.com, M. Paegelow, paegelow@univ-tlse2.fr, N. Maestriperieri, maestriperieri@univ-tlse2.fr, M. Saqalli, mehdi.saqalli@univ-tlse2.fr et L. Houssou, Jaderne@gmail.com (UMR GEODE)

* West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL, Burkina Faso) et Université de Cuenca (Équateur)



▲ Exemple d'un accident entraînant une pollution dans le site de Dayuma et affectant les zones colonisées. © L. Houssou & M. Saqalli

GAMA : une plateforme accessible à tous de modélisation et simulation à base d'agents des systèmes complexes

La modélisation à base d'agents connaît aujourd'hui un succès grandissant pour l'étude des systèmes complexes. Cette approche consiste à étudier un système en modélisant les entités qui le composent sous la forme d'entités informatiques autonomes, appelées agents, ayant leurs propres caractéristiques et comportements. Le concept d'agent, qui provient de l'intelligence artificielle, est versatile : un agent peut représenter différents types et niveaux d'entités, par exemple un être humain, une maison, un groupe social ou une ville. Un modèle à base d'agents peut fournir des informations pertinentes sur la dynamique du système qu'il représente au travers de l'interaction des agents. Il peut également être utilisé comme un laboratoire virtuel pour tester et prévoir l'impact de nouvelles politiques. Enfin, il peut servir de média de discussion dans le cadre de processus de modélisation et simulation participatifs. La construction d'un modèle à base d'agents requiert un travail important de programmation informatique car elle nécessite de décrire sous la forme d'algorithmes l'ensemble des agents ainsi que leurs comportements. La plateforme open-source GAMA, qui est développée depuis 2007 par un consortium d'équipes de recherche



sous l'impulsion de l'unité mixte internationale (UMI) UMMISCO vise à aider les modélisateurs à réaliser ce travail. GAMA est une plateforme générique (adaptée à tout type d'application), qui permet de construire à l'aide d'un langage de modélisation simple d'accès, le GAML, le contenu d'un modèle. Elle connaît depuis quelques années un essor important grâce à sa capacité à construire et simuler des modèles à large échelle, comprenant des centaines de milliers d'agents et des données géographiques détaillées. Elle dispose également d'outils de visualisation 3D avancés ainsi que d'outils dédiés à la construction de jeux sérieux. Cette plateforme est aujourd'hui utilisée dans le cadre de nombreux projets de recherche touchant à des problématiques aussi variées que l'épidémiologie, l'évolution de l'occupation des sols, les risques naturels ou technologiques, la gestion des ressources naturelles ou encore la mobilité urbaine.

Contacts : P. Taillandier (UR MIAT), patrick.taillandier@inra.fr, B. Gaudou (UMR IRIT), benoit.gaudou@ut-capitole.fr, A. Drogoul (UMI UMMISCO), alexis.drogoul@ird.fr

Plus d'informations : <http://gama-platform.org>



▲ Capture d'écran d'une simulation du trafic routier de la ville de Rouen réalisée avec GAMA.



◀ Capture d'écran d'une simulation concernant la qualité de l'air intérieur réalisée avec GAMA.

La plateforme multi-agent MAELIA : modélisation et simulation des systèmes socio-agro-écologiques

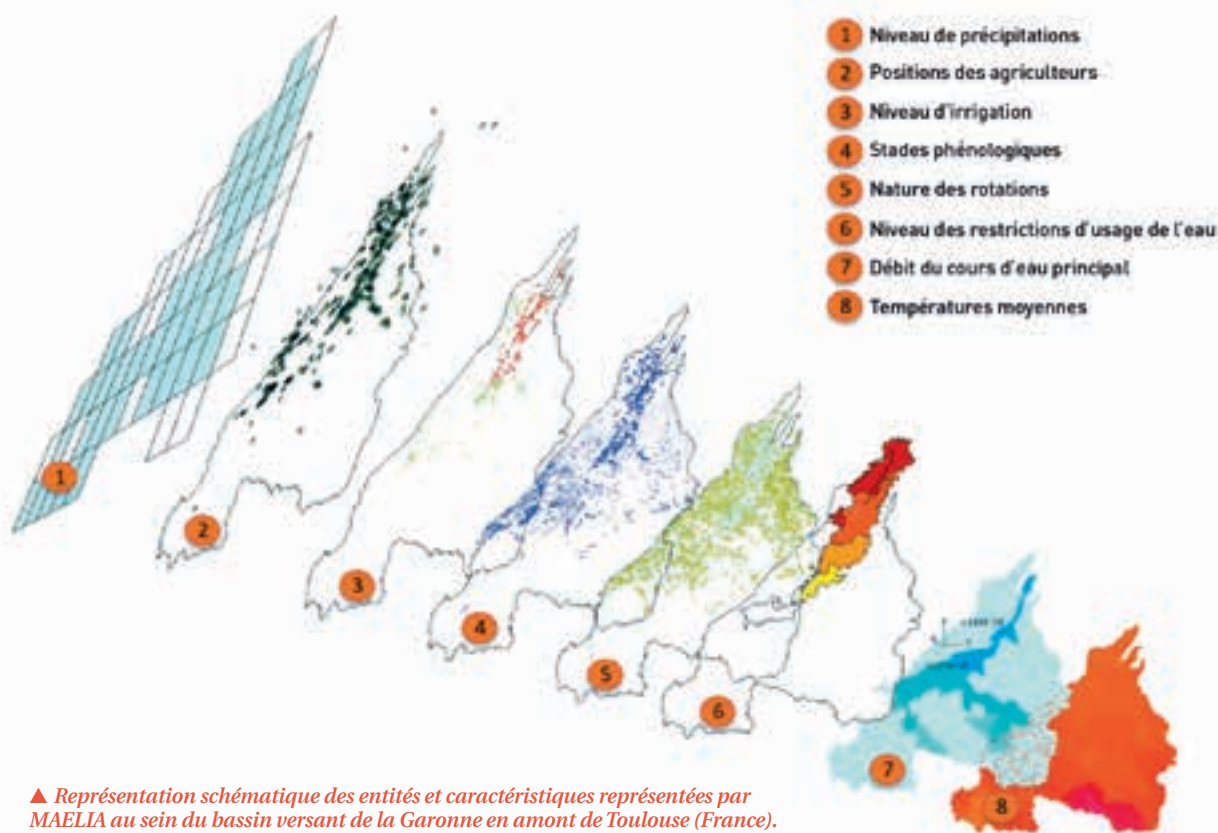
La conception de stratégies durables de gestion des ressources naturelles au sein des territoires ruraux dans un contexte incertain de changements globaux est un enjeu majeur au Nord comme au Sud. MAELIA est une plateforme de modélisation et de simulation, multi-agent, permettant d'évaluer, à l'échelle du territoire, les impacts environnementaux, économiques et sociaux de scénarios de changements combinés de normes de gestion des ressources naturelles, d'activités agricoles, et globaux (démographie, marchés et politiques agricoles, dynamique d'occupation du sol et changements climatiques). De manière originale, MAELIA permet de représenter le fonctionnement et les interactions entre les quatre grands sous-systèmes des systèmes socio-écologiques : (i) l'écosystème, (ii) le système de ressources générées par cet écosystème, (iii) les activités des usagers de ces ressources et (iv) le système de gouvernance des interactions entre usagers et ressources. Actuellement, MAELIA permet de modéliser et simuler, à des résolutions spatiale et temporelle fines, les interactions entre

les activités agricoles (choix d'assolement, conduite des systèmes de culture au sein de chaque système de production), l'hydrologie des différentes ressources en eau (basé sur les formalismes de la plateforme SWAT®) et la gestion des ressources en eau (lâchers de barrage, restrictions). Plus généralement, MAELIA fournit une architecture logicielle développée sous GAMA®, pour représenter les interactions entre activités agricoles, dynamiques du paysage agricole et gestion des ressources naturelles à l'échelle du territoire. Les projets d'extension des fonctionnalités de MAELIA permettront de traiter les questions relatives aux interactions entre systèmes de grande culture et d'élevage, cycles biogéochimiques, régulations biologiques, gestion territoriale des produits résiduels organiques et des systèmes agroforestiers et agroécologiques. Le club des contributeurs au développement de MAELIA implique, actuellement, des laboratoires de recherche (Inra, CNRS, universités, Cirad), ARVALIS, la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne et l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace.

Contacts : O. Therond (Laboratoire Agronomie et Environnement, UMR LAE), olivier.therond@inra.fr, J. Villerd (UMR LAE), jean.villerd@inra.fr, P. Taillandier (UR MIAT), patrick.taillandier@gmail.com, B. Gaudou (UMR IRIT), benoit.gaudou@ut-capitole.fr

Collaborateurs : C. Murgue (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, CACG), B. Lacroix (ARVALIS institut du végétal), D. Leenhardt (UMR AGIR)

Plus d'informations : <http://maelia-platform.inra.fr/>



▲ Représentation schématique des entités et caractéristiques représentées par MAELIA au sein du bassin versant de la Garonne en amont de Toulouse (France).

© Inra/UMR AGIR & LAE

Des modèles de simulation pour analyser l'impact des échanges semenciers et des pratiques paysannes sur la dynamique de l'agrobiodiversité

Le maintien d'une diversité génétique élevée des plantes cultivées a permis, au cours des siècles, la survie et l'adaptation des populations humaines à des régions climatiques défavorables. Cette diversité variétale, maintenue par les pratiques de gestion de semences, permet aujourd'hui aux agriculteurs de faire face aux changements globaux. Les systèmes semenciers paysans permettent le maintien et la circulation d'une diversité de variétés locales et issues de la recherche, facilitant ainsi l'approvisionnement en semences des exploitations en complément de celui national. Le projet IMAS visait la valorisation et le maintien de l'agrobiodiversité dans les pays du Sud à travers l'identification de nouvelles formes de gestion de la diversité variétale qui soient basées sur l'interaction, à différentes échelles, des systèmes semenciers paysans, marchands et institutionnels. La méthodologie reposait sur la co-construction d'outils innovants (modèles multi-agents) capables



d'intégrer les points de vue des différents acteurs, de simuler les aspects dynamiques de la gestion de la biodiversité pour analyser les impacts des évolutions futures, et d'appuyer des démarches participatives d'accompagnement de la recherche-action. Une démarche itérative, avec un retour permanent vers les acteurs (paysans et chercheurs), a permis de confronter leur compréhension du système, aux échelles des systèmes considérés, et de travailler sur la construction et l'appropriation de représentations partagées. Le système semencier est ainsi considéré comme un système complexe caractérisé par la multiplicité des :

- fonctions autour de la semence : production agricole, conservation, sélection, diffusion ;
- échelles et espace-temps : de la parcelle jusqu'au cadre international des politiques publiques ;
- acteurs et points de vue : paysans, organisations gouvernementales, non gouvernementales, chercheurs, etc.

IMAS trouve sa prolongation avec les projets Dynaversity et CoEx. Ce dernier mobilise des méthodes d'analyse de réseaux pour étudier les interactions entre systèmes semenciers paysans et filières semencières certifiées. Il vise à proposer des modes de gouvernance innovants, mieux adaptés à la réalité des pratiques paysannes de gestion de la diversité cultivée.

Contacts : D. Bazile (Cirad DGD-RS/UPR Green), didier.bazile@cirad.fr, V. Labeyrie, vanesse.labeyrie@cirad.fr et J.-P. Müller, jean-pierre.muller@cirad.fr (UPR Green)

Plus d'informations sur IMAS (Impact des modalités d'accès aux semences sur la diversité des ressources génétiques en agriculture) : <http://imas.agropolis.fr/index.html>

Projet CoEx : <https://umr-agap.cirad.fr/projets-de-recherche/coex>

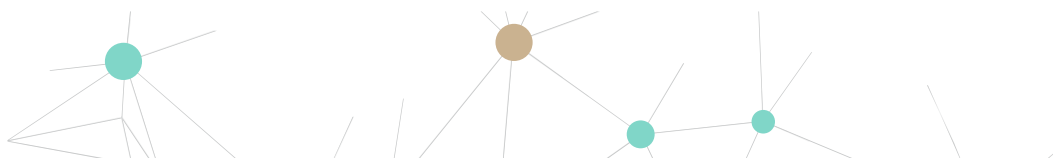
◀ *Atelier de simulation du système semencier quinoa à partir d'un jeu de rôle au Chili. Projet IMAS, décembre 2011 © D. Bazile*

Services écosystémiques et gestion des territoires

La définition de la notion de services écosystémiques offre une grille d'analyse opérationnelle des relations entre socio-systèmes et écosystèmes basée sur les avantages que les acteurs socioéconomiques retirent du fonctionnement des écosystèmes. Elle permet d'élargir les problématiques, et par là les disciplines mobilisées, pour rendre compte des besoins et des modalités des politiques de conservation des écosystèmes, mais également d'autres domaines liés à la gestion des territoires. Outre les évaluations monétaires, très discutées par les défenseurs d'une valeur intrinsèque de la nature, l'identification des services écosystémiques offre un cadre adapté à une approche fonctionnelle de l'analyse des écosystèmes à l'échelle des territoires et à des approches multicritères pour rendre compte de la diversité des impacts et des interactions. Ainsi, la cartographie des services et de leurs interactions au travers de la notion de bouquet de services permettent de mobiliser la notion de paysage comme intégrateur spatial de certains services et d'orienter les exercices de planification territoriale

qui fondent les politiques de développement territorial. L'identification des services et de leurs perceptions par les parties prenantes et les populations facilite la construction collective et concertée d'objectifs de conservation ou de valorisation patrimoniale des services à l'échelle d'un territoire. À ce titre, ce nouveau référentiel contribue à conforter les dispositifs de gouvernance territoriale et à identifier les besoins d'accompagnement pour renforcer la connaissance et reconnaissance des processus écologiques et par là des apprentissages sociaux nécessaires pour s'approprier de nouvelles valeurs pro-environnementales. Dans ce cadre, les services écosystémiques ne sont plus seulement un référentiel exploré par les chercheurs, mais aussi un « outil » de médiation de l'action collective dans le cadre des dispositifs de concertation et de gouvernance territoriale. Les travaux menés par le CEE-M dans ce domaine, concernent à la fois les méthodes d'évaluation (monétaire) et de hiérarchisation des services en appui aux décisions publiques aux échelles nationales, régionales ou locales.

Contacts : H. Rey-Valette, helene.rey-valette@univ-montp1.fr et J.-M. Salles, jean-michel.salles@supagro.inra.fr (UMR CEE-M)



Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production : modélisation et évaluation par simulation du comportement de systèmes complexes

L'ingénierie système est une approche ayant pour objectif de mener à bien et de gérer de manière rigoureuse les activités de conception, de réalisation et d'intégration de systèmes réputés complexes. Reposant sur l'approche systémique, elle promeut entre autres la mise en œuvre de modèles (*Model Based System Engineering*, MBSE). L'équipe ISOE (*Interoperable System & Organization Engineering*) du LGI2P conceptualise et développe pour cela des méthodes de modélisation multi-vues, multi-paradigmes et d'évaluation des capacités et propriétés de systèmes complexes. Par méthode, on entend ici la définition de concepts (du MBSE et du domaine dans lequel se positionne le système cible), de langages de modélisation métier (*Domain Specific Modeling Languages*, DSML), d'une démarche opératoire dédiée pour utiliser la méthode, d'outils supports et d'un repository d'expérimentations. Ces méthodes ont pour objectifs d'appuyer et de guider un collectif d'acteurs multi-métier impliqués de manière collaborative dans diverses activités. Il s'agit ici d'ingénierie des besoins et des exigences, d'ingénierie des architectures, de vérification, validation et évaluation des valeurs, des capacités et des



propriétés (fonctionnelles et non fonctionnelles) attendues par les parties prenantes de ce système. Il s'agit aussi d'assurer la traçabilité des relations et contraintes (décision d'allocation, de décomposition, de structuration, de choix architecturaux) entre les éléments du système d'intérêt (exigences, valeurs, capacités et propriétés attendues) et les alternatives de solutions architecturales produites par l'ingénierie (valeurs, capacités et propriétés fournies en conditions opérationnelles). Les domaines applicatifs privilégient des systèmes techniques et sociotechniques dont des infrastructures critiques (e.g. transport, énergie, eau) en se focalisant sur les propriétés non-fonctionnelles de sûreté, sécurité, résilience, interopérabilité et performance.

Contacts : J. Montmain (LGI2P), jacky.montmain@mines-ales.fr, V. Chapurlat (équipe ISOE), vincent.chapurlat@mines-ales.fr
Plus d'informations : <http://lgi2p.mines-ales.fr>

CALMIP, calcul intensif en Occitanie

Créé en 1994, le mésocentre est devenu une unité mixte de service (UMS) du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en 2014. Hébergé au sein de l'Espace Clément Ader, sur le site de Toulouse Aerospace, le Calculateur en Midi-Pyrénées (CALMIP) fait partie intégrante de la plateforme de calcul intensif qu'il partage avec Météo-France, et bénéficie ainsi d'un environnement technologique de premier plan. Soutenu par la Région Occitanie et ses établissements d'enseignement et de recherche de rattachement, CALMIP renouvelle son calculateur tous les 4 ans. Actuellement en production, la machine Eos a été classée 183^e au TOP 500 lors de sa mise en service en 2014. Au quotidien, une équipe de six ingénieurs assure l'exploitation du calculateur et le support technique et scientifique aux utilisateurs : 250 projets scientifiques en 2016 issus de 45 laboratoires. Fortement ancré au sein de la communauté

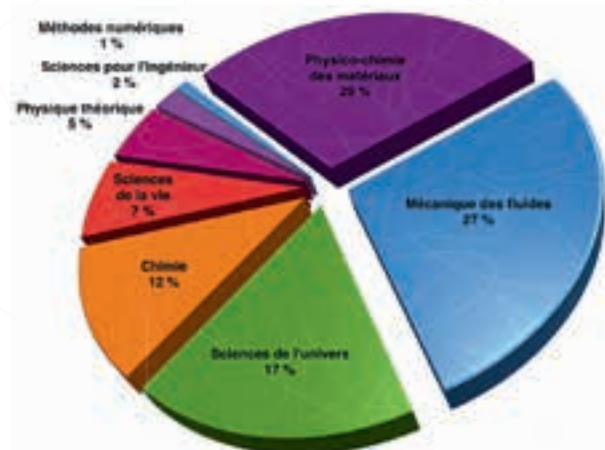


académique, CALMIP apporte la puissance de calcul nécessaire à des chercheurs issus d'horizons très variés : matériaux, mécanique des fluides, sciences de l'univers, chimie, sciences de la vie. Depuis 2008, CALMIP fournit jusqu'à 10 % de sa puissance de calcul au monde des TPE-PME.

Contact : J.-L. Estivalèzes, jean-luc.estivalèzes@imft.fr
Plus d'informations : www.calmip.univ-toulouse.fr



▲ Système de calcul et de stockage. © J.L. Estivalèzes/CALMIP



▲ Répartition des heures de calcul par thématique scientifique.



Modes d'utilisation de l'approche « systèmes complexes »

Les systèmes complexes se rencontrent dans de nombreux domaines de l'action privée, professionnelle, collective, publique... Les exemples de recherche présentés dans ce dossier illustrent le développement de méthodes spécifiques pour mieux appréhender cette complexité. Ce chapitre aborde diverses modalités d'usage de ces approches. Celles-ci peuvent en effet augmenter la capacité de représentation, en proposant des outils pour mieux visualiser l'état d'un système et sa dynamique sous différentes facettes. L'une des difficultés pour les gestionnaires de systèmes complexes, une fois qu'ils disposent de tels outils, est d'arbitrer entre les différentes possibilités qui s'offrent à eux pour conduire leur système selon leur objectif. Certaines approches donnent des outils pour éclairer de telles décisions en situation de complexité — et bien souvent d'incertitude. Elles ajoutent une dimension évaluatrice à la mise en visibilité de l'état du système. La complexité n'étant pas que dans la structure du système à gérer, il s'agit bien souvent d'évaluation multicritère, en cohérence avec la multiplicité des points de vue. Cependant, le gestionnaire est rarement seul, en particulier quand il s'agit d'action publique. Il contrôle difficilement l'ensemble des paramètres du système et doit souvent composer avec la diversité des porteurs d'enjeu qui ont directement ou indirectement une capacité légitime à intervenir sur le système. Chacun a sa vision et ses leviers d'action sur le système. Ce chapitre propose également des méthodes pour faciliter l'évolution de l'action collective vers une action concertée. Enfin, « la pensée complexe » induit de nouveaux modèles de décision, qui mettent les interactions au centre des différentes composantes d'un système à gérer, pour s'appuyer dessus, en tirer parti et non plus essayer de les restreindre.

La première section est consacrée à l'usage d'observatoires de systèmes complexes, ce qui implique une acquisition et un traitement réguliers d'indicateurs sur une large étendue territoriale et pour une large palette d'observables. Le traitement de ces données permet de générer des alertes par la mise en relation d'indicateurs *a priori* distants dans le temps, l'espace ou les thématiques considérées. Cette section met en avant la plus-value des images satellitaires pour alimenter en données ces observatoires et en faire des outils potentiels d'aide à la décision. Le traitement de ces grandes masses de données est dynamique et implique le développement de modèles spécifiques permettant d'explicitier les conséquences de choix d'action sur les différentes facettes d'un système complexe.

La deuxième section développe l'aide à la décision multicritère pour des problématiques plus ciblées impliquant l'analyse et la pondération entre une multiplicité de critères interdépendants. Un premier niveau d'aide à la décision concerne la mise en capacité des acteurs d'un territoire à mieux comprendre les interdépendances entre ses différentes facettes et explorer les réponses à des choix d'action dans différents contextes. De manière plus classique, l'aide à la décision met en comparaison des alternatives. Le travail de la complexité, en particulier sur les interdépendances entre critères, au-delà de hiérarchiser les préférences, aide à comprendre en quoi un choix fait pour un objectif modifie la capacité à atteindre un autre objectif, en dehors du champ d'intérêt et de vision initial.

Cette demande d'aide à la décision se fait dans de nombreux domaines d'application : halieutique, gestion quantitative de l'eau, santé, etc. La prise en compte du facteur temps est essentielle pour mener à bien une comparaison pertinente, notamment par des analyses diachroniques. Les interdépendances se réalisent aussi avec des effets retards ou *via* des accumulations qui ne deviennent significatives que sur des pas de temps suffisamment longs.

La prospective territoriale travaille ainsi à développer sur des périodes relativement longues (au regard des temps caractéristiques de la gestion) des histoires (« narratives ») plausibles et contrastées d'évolution du système favorisant une réflexion nécessaire sur ces choix.

La troisième section focalise sur les aspects sociaux de participation et de concertation. Les exemples décrits prennent explicitement en charge la diversité des acteurs impliqués dans la conduite du système. Ce n'est plus seulement un « décideur » idéal qu'il convient d'aider à décider, mais un collectif dont les membres n'ont pas nécessairement de liens institutionnels spécifiques régissant leurs interactions relevant de leurs actions sur le système à gérer. Un premier angle d'approche est la participation de parties prenantes aux processus modélisés avec différents niveaux d'implication selon les objectifs recherchés. Des exemples sont donnés sur les changements sociaux, la gestion de l'eau et des territoires, la santé. Ils font référence à un cadre épistémologique initial commun en s'appuyant sur une diversité d'outils : modèles de simulation, jeux de rôles, ateliers *ad hoc*... La présence d'incertitude est fondamentale. Les méthodes proposées illustrent différents moyens de la prendre en compte. L'enjeu est parfois d'amener les acteurs à prendre conscience des incertitudes et de leurs conséquences, plutôt qu'à tenter de les réduire. Enfin, les méthodes présentées insistent sur les interactions entre recherche et société : la nature complexe des systèmes ne peut en effet être saisie par les seules connaissances académiques et s'enrichit de formes de connaissance complémentaires, notamment celles fondées sur l'expérience pratique, et de la mise à l'épreuve permanente d'une forme de connaissance par l'autre.

La dernière section ouvre à de nouveaux modèles pour la décision en situation complexe. Les exemples présentés explorent notamment la mise en synergie de types de modélisation très différents, tant dans le formalisme mathématique (analytique, probabiliste, bayésien...) que dans les outils de simulation informatique. Ils illustrent quelques grands enjeux majeurs dans le domaine de l'agroécologie pour la recherche de compromis entre services écosystémiques, et celui de la gestion de l'eau pour l'anticipation des risques de crues éclair et pour la dépollution d'une ressource de plus en plus menacée.

Olivier Barreteau (UMR G-EAU)
et Claude Monteil (UMR DYNAFOR)

Modes d'utilisation de l'approche « systèmes complexes »

Les structures de recherche développant des activités sur une (ou plusieurs) thématique(s) de ce chapitre sont consignées dans le tableau ci-dessous. La couleur vert foncé ■ indique une thématique dans

laquelle une équipe développe principalement ses activités, le vert clair ■ une thématique dans laquelle elle est également impliquée. L'emplacement d'un article est signalé par un numéro de page.

- 3.1. Usage des observatoires
- 3.2. Aide à la décision multicritère
- 3.3. Participation et concertation
- 3.4. Nouveaux modèles pour la décision

Structures de recherche - Modes d'utilisation de l'approche « systèmes complexes »**	3.1	3.2	3.3	3.4
AGIR • Agroécologie - Innovations – Territoires				
Agro • Agronomie et développement durable				
AMAP • botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations				
ASTRE • Animal, Santé, Territoires, Risques & Écosystèmes	p. 57	p. 62	p. 65	
CEE-M • Centre d'Économie de l'Environnement de Montpellier				
CeMEB • Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité				
CERTOP • Centre d'Étude et de Recherche Travail Organisation Pouvoir			p. 67	
CINES • Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur				
DIMNP • Dynamique des Interactions Membranaires Normales et Pathologiques				
DYNAFOR • Dynamiques et écologie des paysages agriforestiers			p. 66	
ESPACE-DEV • Espace pour le développement	p. 57/58/59			
G-EAU • Gestion de l'eau, acteurs, usages		p. 63	p. 64/65	
GEODE • Géographie de l'Environnement		p. 61		
GEOSUD • GEOinformation for Sustainable Development				
GREDE • Gouvernance, Risque, Environnement, Développement		p. 62		
GREEN • Gestion des ressources renouvelables et environnement			p. 64/67	
HSM • HydroSciences Montpellier				
IMFT • Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse				p. 69
IRIT • Institut de Recherche en Informatique de Toulouse	p. 57			
ITAP • Information-Technologies-Analyse environnementale-Procédés agricoles				
L2C • Laboratoire Charles Coulomb				
LBE • Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement				p. 68
LGI2P • Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production		p. 60		
LGP • Laboratoire Génie de Production				p. 69
LISST • Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires				
MIAT • Mathématiques et Informatique Appliquées de Toulouse				p. 68
MISTEA • Mathématiques, Informatique et Statistique pour l'Environnement et l'Agronomie				p. 68
MIVEGEC • Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle				
Numev • Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant				
OREME • Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement				
SMS • Structurations des Mondes Sociaux				
SYSTEM • Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens				
TETIS • Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale	p. 57	p. 60		
TULIP • Towards a Unified theory of biotic interactions : roLe of environmental Perturbations				
Virtual Plants • Institut national de recherche en informatique et en automatique				
XSYS • Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse				
#DigitAg • Institut Convergences Agriculture Numérique				

** Un tableau récapitulatif de l'ensemble des thématiques couvertes par les équipes de recherche (et autres structures de recherche) est présenté page 72.

Usage des observatoires

Systèmes d'informations complexes multi-contextes pour la gestion des alertes

Au sein des systèmes d'informations (SI) complexes, de nombreux travaux concernent la surveillance et la gestion de crises. Au-delà des normes ISO 27000 qui formalisent le concept de système de gestion de la sécurité de l'information, comment prendre en compte les alertes dans différents contextes (logicielle, écologique, environnementale, épidémiologique, industrielle...) et niveaux de criticité, pour détecter le passage du fonctionnement nominal du système à celui accidentel ? Se confronter aux questions liées aux changements de paradigmes entre un mode d'usage normal et un mode de gestion de crise implique une dimension générique des modèles proposés afin de dire comment intervient et s'opère ce changement d'usage : mécanisme de remontée d'informations ou d'alertes, décision et changement du type de gouvernance ? Quelle est l'implication dans le suivi de l'information, le SI, ses interfaces, dans les processus de décision, de suivi et de diffusion d'alertes ? Les phénomènes de (fausses) alarmes, « fakes », « buzz », « spams », rumeurs issus des réseaux sociaux, repositionnent les problématiques de qualité de l'information et de confiance des systèmes

dédiés à la diffusion des alertes/alarmes de tous ordres et aux systèmes d'aide à la décision. Les modèles sous-jacents reposent sur différentes facettes :

- Gestion des activités de contrôle et surveillance
- Gestion des alertes et des événements anormaux
- Dynamique et intégration de la gestion de crise dans les SI
- Reconfiguration dynamique d'environnements complexes
- Adaptation de la supervision à la sécurité des infrastructures, villes connectées, cybersécurité, gestion de crises...
- Pérennité du SI : plan de continuité d'activité/plan de continuité informatique
- État et maintien pendant la crise du(des) vecteur(s) de diffusion de l'alerte

Contacts : F. Sedes (UMR IRIT), florence.sedes@irit.fr; T. Libourel (UMR ESPACE-DEV), therese.libourel@umontpellier.fr; A. Miralles (UMR TETIS), andre.miralles@teledetection.fr

Des images satellitaires pour construire des cartes de risque de transmission de maladies vectorielles

Les maladies à transmission vectorielle sont des maladies infectieuses pour lesquelles des arthropodes hématophages « vecteurs » (mouches, moustiques...) assurent la transmission de l'agent pathogène entre hôtes vertébrés. Pour mieux comprendre ces systèmes complexes, les applications de la télédétection et de la modélisation spatiale sont multiples et se sont développées depuis quelques décennies, jusqu'à la mise au point d'outils prédictifs utilisés par les acteurs de santé pour mieux cibler la surveillance et le contrôle. Les informations extraites des images satellitaires sont des indicateurs indirects de la présence ou l'abondance des vecteurs ou des hôtes impliqués dans la transmission, liés à la température de surface, l'occupation du sol, les zones en eau, la végétation, et pouvant être mesurés à des fréquences allant du jour à l'année. Des approches de modélisation complémentaires permettent d'intégrer ces informations dans la prédiction des risques.

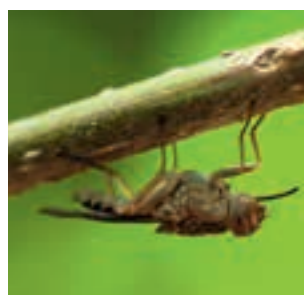
Les modèles statistiques, basés sur les données observées, mettent en évidence des liens entre indicateurs environnementaux et données entomologiques ou épidémiologiques. Plusieurs études ont démontré l'intérêt d'une telle approche, par exemple pour la trypanosomose animale, la fièvre du Nil Occidental ou la fièvre de la Vallée du Rift. D'autre part, des modèles basés sur les connaissances (cycle de transmission, écologie des vecteurs et des hôtes), peuvent assimiler des données de télédétection, comme, par exemple, des modèles de dynamique de populations pour la cartographie dynamique des densités des moustiques vecteurs de la dengue et du chikungunya, ou la fièvre de la Vallée du Rift. L'essor de langages de programmation dédiés à la modélisation de dynamiques spatiales, permettant l'assimilation temporelle des séries d'images satellitaires, favorise ce développement (voir par exemple la plateforme de modélisation Ocelet p. 45). Aujourd'hui l'offre et l'accessibilité croissantes de l'imagerie satellite et aéroportée, ainsi que le développement de techniques comme la télémétrie, présentent de nouvelles perspectives de recherche qui requièrent une forte interdisciplinarité entre écologues, épidémiologistes, entomologistes, géographes, modélisateurs et télédéTECTEURS.

Contacts : A. Tran (UMR TETIS/UMR ASTRE), annelise.tran@cirad.fr; P. Degenne (UMR TETIS), pascal.degenne@cirad.fr; L. Guerrini (UMR ASTRE), laure.guerrini@cirad.fr

Plus d'informations : Pôle de données et de services surfaces continentales Theia, thématique « Santé » : www.theia-land.fr/fr/themes/sant%C3%A9



▲ Image SPOT-6, Cambodge. Les images à haute résolution spatiale permettent de cartographier les différents types d'occupation du sol qui constituent l'habitat de différentes espèces de moustiques ou d'autres vecteurs et réservoirs. © Airbus DS 2016, reproduit par le Cirad en vertu de la licence Airbus DS



▲ La glossine *Glossina palpalis* gambiennsis. © O. Esnault/Cirad



▲ Session de capture de vecteurs : moustiques, Sénégal. © A. Tran/Cirad

Observatoire scientifique pour l'aide à la décision

Plusieurs expériences (ROSELT/OSS*, Observatoire santé en Indonésie, GEOSUD) liées à l'observation et l'aide à la décision ont permis une réflexion collective autour de l'objet « observatoire ». Un observatoire scientifique Sociétés-Milieus en appui aux gestionnaires de territoire (OSAGE) est un instrument de production scientifique qui permet, sur le temps long, de comprendre et documenter les processus en jeu relatifs à une question posée par la société, faciliter les discussions et négociations entre acteurs et, *in fine*, renseigner en préalable les décisions des gestionnaires de territoires. C'est un système opérant, artificiel (car créé par et pour l'homme) et intégré puisqu'il articule trois dispositifs (cf. ci-dessous) :

- Le dispositif scientifique mobilise une connaissance initiale, pointe les données à mobiliser ou acquérir, acquiert des données, produit des informations et enrichit par boucles itératives la connaissance initiale sur les fonctionnements et dynamiques systémiques en jeu. Il engage le suivi

spatial et temporel ; il est garant de la qualité et pertinence scientifiques des activités.

- Le dispositif technique assure des services pour acquérir, stocker, traiter, gérer, partager, échanger et diffuser les données, informations et connaissances ; il est garant de la robustesse, répétitivité, maintenance des services rendus.

- Le dispositif organisationnel organise la gouvernance de l'observatoire, avec des rôles distribués auprès d'acteurs identifiés et mobilisés (opérateurs) pour intégrer les dimensions scientifiques, techniques et administratives de l'observatoire ; il définit les règles de partage et diffusion des données et informations ; il est garant de son opérationnalité et pérennité.

Le périmètre de l'observatoire est défini pour représenter l'espace concerné par la question posée. Comme tout système, l'observatoire peut être élémentaire (un groupe d'opérateurs, un périmètre), ou complexe (plusieurs groupes d'opérateurs, plusieurs périmètres**) pour répondre à une même question selon l'échelle à considérer.

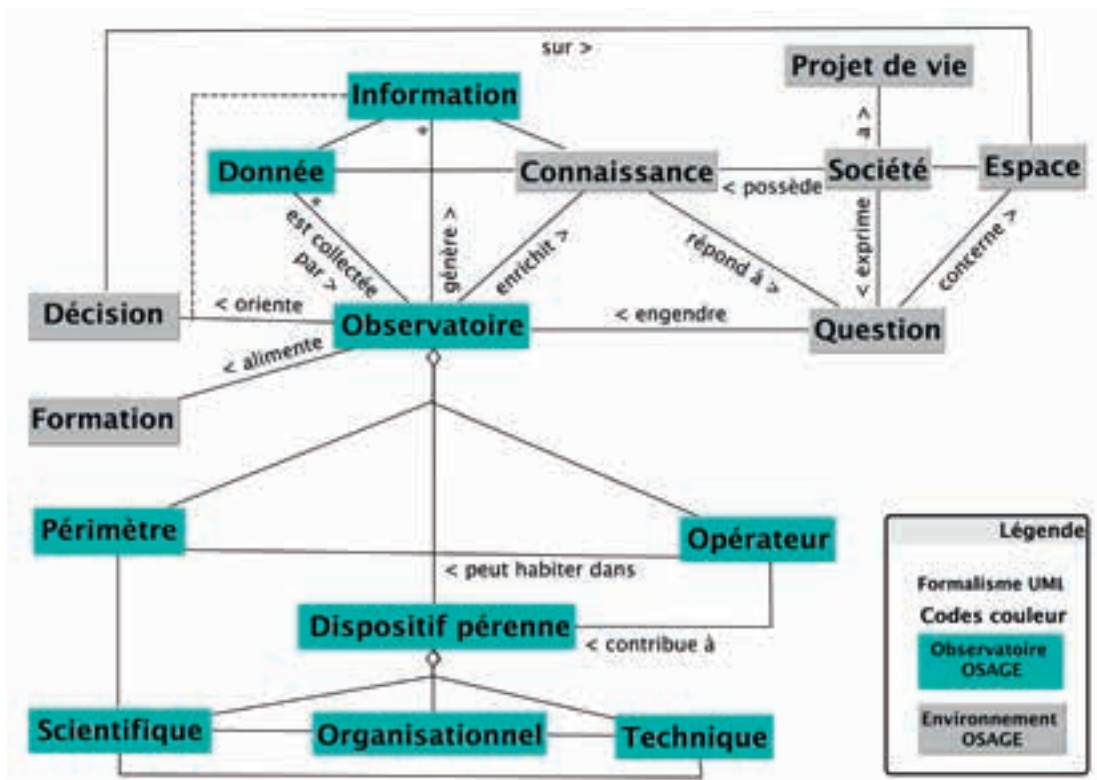
Contacts : M. Loireau, maud.loireau@ird.fr, M. Fargette, mireille.fargette@ird.fr, T. Libourel, therese.libourel@umontpellier.fr et J.-C. Desconnets, jean-christophe.desconnets@ird.fr (UMR ESPACE-DEV)

* Réseau d'Observatoires pour la Surveillance Écologique à Long Terme (Observatoire du Sahara et du Sahel)

** Dans ce cas, il s'agit d'un réseau d'observatoires.



▲ Mise en défens de plus de 20 ans dans l'observatoire de Dantiandou. Dispositif National de Surveillance Environnementale du Niger. © Maud Loireau, 2010



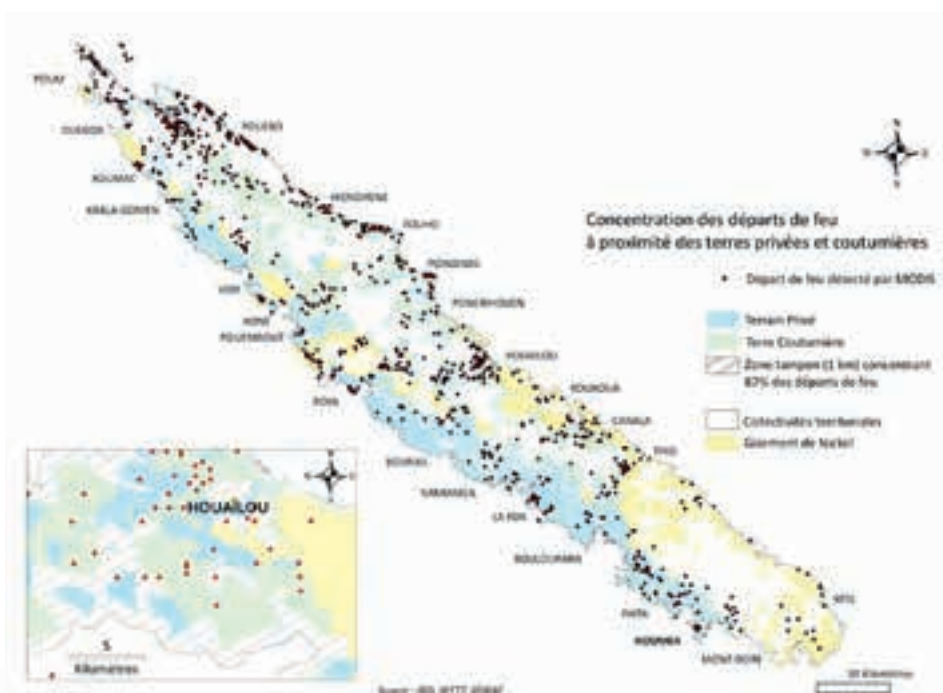
▲ Structure générale de l'Observatoire Scientifique en Appui aux Gestionnaires de territoires (OSAGE) –formalisme UML. Adapté de Loireau et al.

Modélisation des incendies et de leurs impacts sur la biodiversité

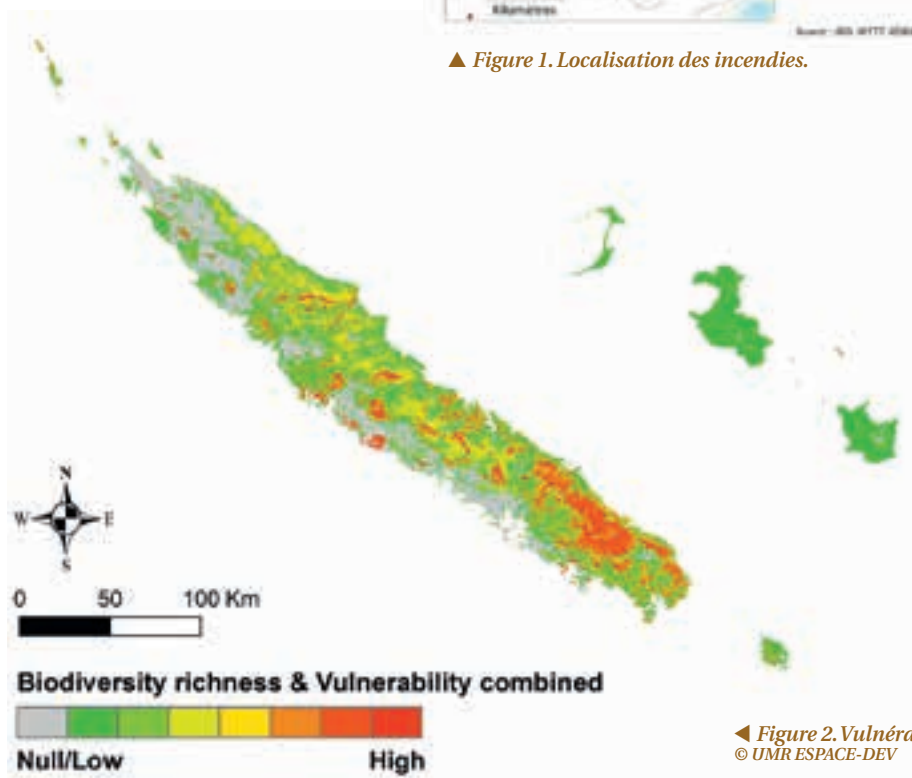
Dans le cadre du projet « Incendies et Biodiversité », l'un des principaux résultats a été la mise au point d'un modèle spatialement explicite du risque d'incendie en Nouvelle-Calédonie intégrant une approche statistique bayésienne utilisant l'historique des incendies (localisations et superficies) survenus au cours de la période 2000-2010 obtenu par télédétection (cf. fig.1), et une approche mécanistique du comportement des feux. Ce modèle exploite l'ensemble des connaissances accumulées dans les différentes disciplines du projet (biologie, botanique, météorologie, mathématique, télédétection, etc.) et les combine au sein d'un réseau bayésien afin de produire des cartes dynamiques de risque d'incendie et d'impacts. Il fournit notamment une estimation quotidienne du risque de feu, sous forme de probabilités, en tout point de la Grande Terre (sur une grille de 300mx300m).

Contacts : M. Mangeas, morgan.mangeas@ird.fr
et M. Despinoy, marc.despinoy@ird.fr (UMR ESPACE-DEV)

Ce modèle calcule d'abord une probabilité de départ du feu selon les conditions météorologiques, l'état de stress hydrique de la végétation sur pied, des distances aux routes et aux tribus. La seconde probabilité, calculée à l'aide d'un modèle mécanistique développé aux États-Unis (*Flammapp*), fournit une estimation de la propagation du feu à partir des positions potentielles de départ d'incendie, d'une durée de 6 heures pour représenter le cas extrême d'un feu qui durerait tout un après-midi et des vitesses de propagation simulée selon le type de temps en tout point. La troisième probabilité concernant la sévérité du feu immédiate est calculée sur la zone « touchée » et croise les intensités simulées selon le type de temps et le type d'écosystème. La quatrième probabilité estime l'enjeu pour la biodiversité (cf. fig.2) en intégrant la biodiversité comptabilisée et son type (endémisme notamment). Ce modèle est actuellement mis à disposition aux acteurs/décideurs du feu en Nouvelle-Calédonie via un site internet dédié, et à vocation à être décliné/transformé en un système de vigilance opérationnel pour prévenir les pertes en biodiversité.



▲ Figure 1. Localisation des incendies.



◀ Figure 2. Vulnérabilité de la biodiversité face au feu.
© UMR ESPACE-DEV

Aide à la décision multicritère

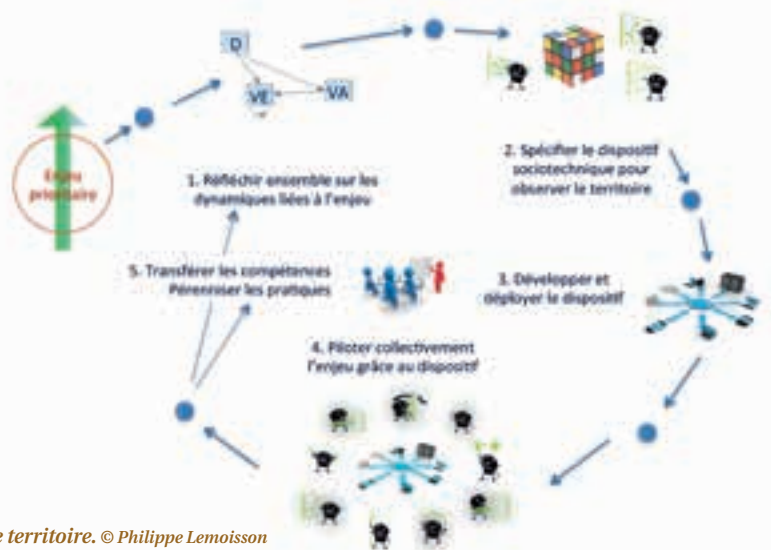
L'observatoire du territoire de Thau : accompagnement des apprentissages chez les acteurs de Thau

Depuis le milieu des années 2000, les acteurs de Thau (Hérault, France) ont renforcé leurs efforts de reconquête de la qualité environnementale et de développement du territoire en décloisonnant les gouvernances sectorielles imposées par chaque politique publique (aménagement, eau, environnement). En 2005, une équipe d'ingénierie territoriale a été mise en place : le Syndicat Mixte du Bassin de Thau (SMBT). Entre 2005 et 2014, les documents de planification à long terme (schéma de cohérence territoriale, schéma d'aménagement et de gestion des eaux, Natura 2000) ont été élaborés de façon coordonnée, un ambitieux programme d'actions (contrat de gestion intégrée 2012-2018) a été lancé et des dispositifs innovants de surveillance environnementale (suivi préventif des malaïgues, VigiThau et observatoire de Thau) ont été créés. Parmi ces dispositifs, l'observatoire de Thau est dédié au suivi des actions du contrat de gestion intégrée. Une application Web, conçue conjointement par le SMBT et l'UMR TETIS, est en cours de développement ; son composant central est une interface multimodale de visualisation des indicateurs (cartes thématiques, diagrammes diachroniques, suivi d'objectif...).

Vu comme un produit, l'observatoire alimente en données, cartographies et documents techniques les acteurs et instances engagés dans l'action collective (élus, techniciens, acteurs économiques, associations, citoyens). Vu comme le processus illustré dans la figure ci-contre, l'observatoire accompagne les apprentissages chez ces mêmes acteurs du territoire. En

Contact : P. Lemoisson (UMR TETIS), philippe.lemoisson@cirad.fr

phase I, une réflexion commune sur les dynamiques en jeu va permettre de spécifier le dispositif de suivi. Dès que le dispositif est déployé, il devient le support de l'action collective et favorise ainsi le transfert de compétences et la pérennisation des pratiques. À l'issue d'une période de pilotage, les connaissances acquises sont exploitées collectivement pour enrichir la compréhension du système complexe « territoire » et permettre une nouvelle itération.



► Apprentissage collectif et action sur le système territoire. © Philippe Lemoisson

Méthodes multicritères d'aide à la décision pour la comparaison d'alternatives : application à la gestion de l'environnement

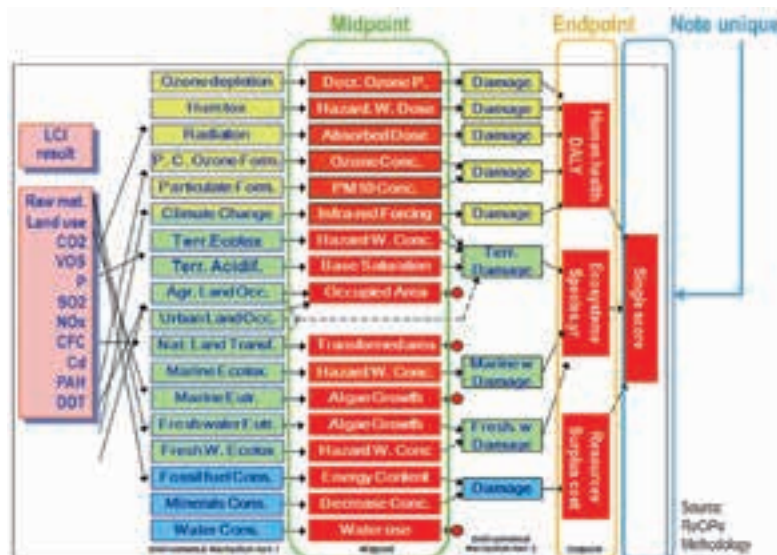
L'équipe KID (LGI2P d'IMT Mines Alès) a acquis un niveau d'expertise reconnu en analyse multicritère et aide à la décision en environnement incertain, ce qui lui a valu de réaliser en 2015-2016 l'étude « Utiliser l'analyse multicritère pour la prise de décision en analyse du cycle de vie (ACV) »*. L'ACV est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux des produits et process, faisant l'objet d'une standardisation internationale, basée sur une approche fonctionnelle multicritère (cf. figure ci-contre). Le LGI2P a proposé une formalisation de la procédure d'évaluation qui a été testée sur le calcul de l'impact environnemental de véhicules. Le LGI2P, en collaboration avec ENGIE, réalise depuis, pour l'ADEME, une comparaison de technologies « bas carbone » avec des méthodes et outils de l'analyse multicritère. Les critères environnementaux doivent être complétés par des critères technologiques, économiques et sociaux pour une comparaison plus aboutie des technologies rapportées aux usages. Plus le modèle d'agrégation sera sophistiqué, meilleure sera la modélisation des préférences du décideur, mais la quantité d'informations demandée sera d'autant plus importante. Par exemple, un modèle basé sur une simple moyenne pondérée nécessitera peu d'informations alors qu'un modèle sophistiqué basé sur des intégrales floues nécessite un recueil bien plus conséquent. Les problématiques de décision que soulève la gestion de l'environnement nécessitent l'intervention d'analystes pour formaliser la construction des connaissances utiles à la décision. Il faut y distinguer deux types de réalités : les réalités qui relèvent de propriétés physiques et qui reposent sur des perceptions sensorielles susceptibles d'être vérifiées par des expériences répétables (e.g., phénomènes de dispersion de gaz toxiques) ; les réalités pour lesquelles le consensus ne repose

plus sur la perception, mais qui font intervenir des systèmes de valeurs propres à une société, une politique (e.g., vulnérabilité d'un territoire). Le travail des analystes de KID consiste alors à aider le décideur à identifier « une » hypothèse de travail, puis à construire les connaissances utiles à la décision en distinguant bien les deux types de réalité sous cette hypothèse et enfin à rendre sa décision communicable.

Contact : J. Montmain (LGI2P), jacky.montmain@mines-ales.fr

Plus d'informations sur l'équipe KID (Knowledge representation & Image analysis for Decision) : <http://lgi2p.mines-ales.fr/pages/equipe-de-recherche-kid-0>

* Étude réalisée pour l'association nationale des grands groupes industriels français SCORE LCA.



► Les indicateurs d'impacts pris en compte par l'ACV et les étapes d'agrégation multicritère nécessaires : agrégation des Midpoint en Endpoint, puis des Endpoint à un score final unique. Source : ReCiPe Methodology

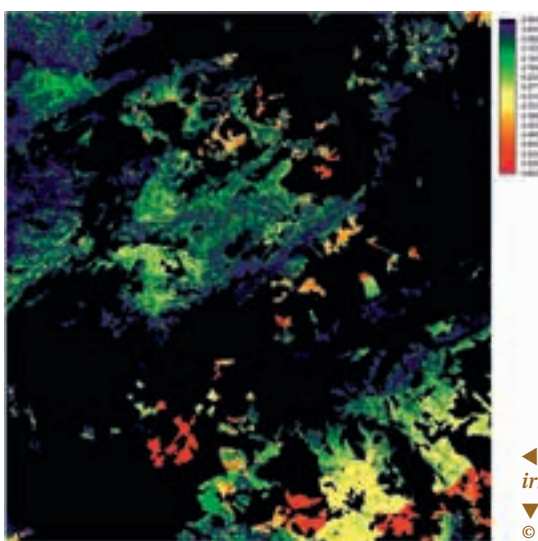
La prospective territoriale : de la modélisation spatio-temporelle aux scénarii futurs

Parmi les approches de la modélisation spatio-temporelle visant une simulation future, on distingue deux approches : les PBM (*pattern based model*) et les ABM (*agent based model*). La première part des formes d'occupation du sol, caractérise leurs changements et vise à trouver des drivers pouvant statistiquement expliquer les quantités et distributions spatiales observées. Les modèles multi-agents focalisent sur les interactions des acteurs entre eux et avec leur environnement. Les représentations et les connaissances des acteurs leur donnent la capacité de prendre des décisions, de communiquer et d'évoluer au sein de socio-écosystèmes complexes pouvant être spatialisés et scénarisés dans le temps.

La prospective implique deux tâches : une projection en termes de surface de l'élément modélisé (par exemple une zone forestière) et son allocation spatiale. Les méthodes mises en œuvre pour chacune de ces tâches dépendent de la nature de la prospective. Ainsi, on distingue trois familles : BAU (*business as usual*), scénarii exploratoires

(tendanciels et contrastés) qui vont du présent vers le futur (*forecasting*) et les normatifs (*backcasting*). S'il s'agit de calculer les transitions futures, la plupart des modèles recourent à une estimation probabiliste, souvent par chaîne de Markov. Pour l'allocation spatiale des quantités simulées, la palette des techniques est plus fournie et englobe des solutions (géo-)statistiques, cartes d'aptitude obtenues par évaluation multicritère ou encore apprentissage par réseau neuronal. Un recours grandissant à la prospective territoriale, visant notamment des enjeux agro-environnementaux, permet d'évaluer de manière spatialement explicite l'impact des activités humaines sur un territoire. La prospective territoriale signifie anticiper, gérer, scénariser les changements attendus, plausibles ou possibles, dans des domaines aussi divers que la gestion des risques, les études d'impact, l'urbanisation ou encore les répercussions du changement global. Dans ce contexte, l'évaluation multicritère permet de gérer de multiples drivers et de distinguer entre contraintes et facteurs, de gérer la pondération et le niveau de compensation de ces derniers.

Contacts : M. Paegelow (UMR GEODE), paegelow@univ-tlse2.fr, N. Maestripiéri (UMR FRAMESPA), maestripiéri@univ-tlse2.fr, M. Saqalli (UMR GEODE), mehdi.saqalli@univ-tlse2.fr



◀ Carte de potentiel de transition entre cultures non irriguées et cultures irriguées, région de Murcia (Espagne). © GEODE

▼ Cartographie de 4 scénarii contrastés, San Juan de la Costa (Chili). © GEODE



Modèle de système halieutique combinant les dynamiques de la ressource et de l'exploitation

Les exploitations halieutiques sont des systèmes complexes associant un grand nombre d'éléments en interactions. Une exploitation peut ainsi être observée à partir de plusieurs points de vue, et décrite selon un cadre associant certains de ces éléments. D'un point de vue statistique, une exploitation est décrite selon une synthèse des données disponibles, incluant un maximum de l'information qu'elles contiennent, et en référence aux questions initialement posées et – éventuellement – en référence aux questions soulevées par l'analyse de ces données. Dans le cas de la pêche artisanale au Sénégal, ces questions soulevées sont relatives à la variabilité de l'impact des actions de pêche selon les



décisions des pêcheurs. Cette variabilité pose problème si la question initiale est celle de l'impact de l'activité d'exploitation sur une ressource en vue de sa gestion « rationnelle ». En effet, cette variabilité d'impact se traduit par une mauvaise corrélation entre abondance et rendements de pêche et par une mauvaise qualité du nombre d'actions de pêche en termes de variable de contrôle de leur impact. Cette variabilité peut toutefois être source de viabilité pour des pêcheurs qui, selon l'accessibilité des populations de poissons, peuvent choisir à chaque moment une méthode efficace parmi celles dont ils disposent. Il devient alors nécessaire d'intégrer cette possibilité de choix au cadre de représentation, selon un modèle articulant la dynamique d'une ressource plurispécifique, avec celle de l'exploitation menée par des unités de pêche disposant de plusieurs méthodes. Les paramètres du modèle sont estimés par les valeurs qui conduisent à reconstituer des données d'activités et de rendements de pêche les plus proches possibles de celles résultant des observations collectées par des enquêtes. Il est alors possible de répondre, sous forme de fonctions des estimations des paramètres, à des questions faisant intervenir les décisions des pêcheurs, en relation avec des objectifs multicritères, relatifs à l'état de la ressource, aux résultats économiques et au contexte social.

Contacts : F. Laloë, francis.laloe@laposte.net
et D. Hervé, dominique.herve@ird.fr (UMR GRED)

◀ *Pêche au large de la côte sénégalaise lors d'une expérimentation de palangres profondes. Ici les pêcheurs décident d'utiliser des lignes à main avant de poser les palangres « rangées » dans les caisses avec les hameçons piqués sur les bords (premier plan). © Conrath/Laloë, 1987.*

Approches et outils innovants pour évaluer les systèmes de surveillance en santé

Agriculture et production animale assurent sécurité alimentaire et survie des communautés notamment des plus pauvres. Une détection précoce des maladies animales par le biais de systèmes de surveillance efficaces est critique pour éviter leur émergence ou réémergence. Malgré les efforts de la communauté internationale, l'efficacité de ces systèmes reste limitée dans les pays les plus pauvres. Des faiblesses existent aussi dans les pays industrialisés, liées à des difficultés de communication et de collaboration entre acteurs aux niveaux local et national. Ceci impacte la déclaration des événements sanitaires par les éleveurs et influence le fonctionnement des systèmes de surveillance. La complexité des systèmes de surveillance et des processus de décisions des acteurs nécessite des approches intégratives et interdisciplinaires afin d'évaluer ces facteurs couplant épidémiologie, sociologie, économie et sciences politiques. Ces éléments n'étaient, jusqu'à récemment, peu voire non pris en compte dans les démarches d'évaluation et d'optimisation des systèmes.

L'UMR ASTRE développe et applique des méthodes et outils d'évaluation intégrative des systèmes de surveillance, combinant épidémiologie participative, modélisation et techniques économétriques. Ces approches s'intéressent à la fois au processus des systèmes de surveillance en santé (organisation des réseaux d'acteurs et prise de décision) mais également aux conséquences liées à la transmission d'informations sanitaires, et ce afin d'appréhender les performances techniques, les niveaux d'acceptabilité et de confiance, les bénéfices monétaires et non monétaires. Ces éléments sont essentiels à l'identification d'actions adaptées

pour améliorer les performances des systèmes et assurer leur pérennité en engageant un processus collectif dans le changement. Ces approches ont été appliquées en Asie du Sud-Est mais également en Europe où il existe une demande croissante d'outils d'aide à la décision en stratégie de santé. Ces outils génèrent de l'information locale pour informer et mieux définir les stratégies sanitaires au niveau national, et favorisent ainsi le dialogue entre décideurs politiques et acteurs du système.

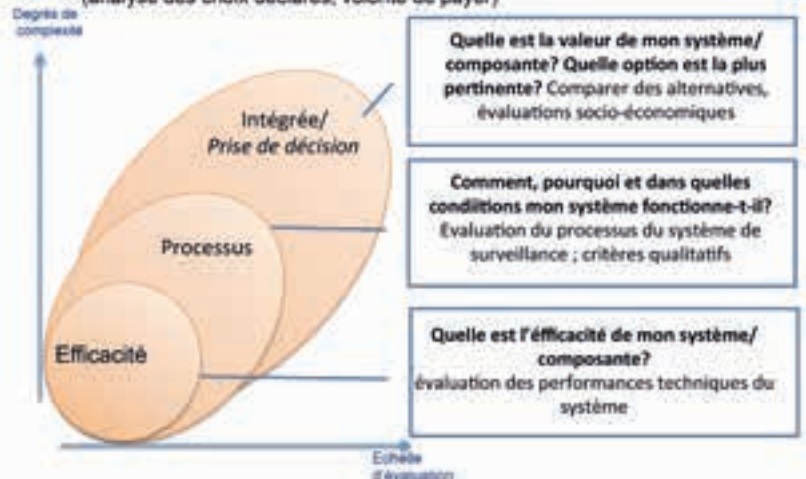
Contacts : M. Peyre, marisa.peyre@cirad.fr
et F. Goutard, flavie.goutard@cirad.fr (UMR ASTRE)

Plus d'informations :

www.fp7-risksur.eu
<http://webtools.fp7-risksur.eu/>
<http://revasia.cirad.fr>

Promouvoir une approche d'évaluation intégrée

- **Epidémiologie**
- **Sciences Sociales:** participation, analyse des réseaux sociaux, cartographie d'acteurs
- **Economie:** économie comportementale, expérimentale (analyse des choix déclarés, volonté de payer)



► *Les différents niveaux d'évaluation des systèmes de surveillance en santé. Il existe différents types d'évaluation des systèmes de surveillance en santé, l'évaluation intégrative englobe l'évaluation du processus et des performances techniques. Chaque type et niveau d'évaluation permet de répondre à différents enjeux : techniques, fonctionnels et socio-économiques.*

© M. Peyre/ASTRE

Aide à la gestion de réservoirs multi-objectifs dans le bassin du fleuve Sénégal : évaluation multicritère de différents modes de gestion

Concernant quatre États d’Afrique de l’Ouest (Guinée, Mali, Mauritanie, Sénégal), l’aménagement et la gestion des ressources en eau du bassin du fleuve Sénégal visent à satisfaire deux groupes d’objectifs concurrentiels : (1) production d’énergie électrique, protection contre les fortes crues et soutien d’étiage pour l’eau potable, l’irrigation et la navigation, objectifs favorisés par une régularisation maximale des écoulements ; (2) des objectifs socio-environnementaux qui exigent le maintien de crues inondant suffisamment le lit majeur dans la vallée, pour permettre la pratique des cultures traditionnelles de décrue, favoriser la recharge des nappes et éviter l’affaiblissement des ressources piscicoles et de la biodiversité...

Des modèles numériques ont été développés afin d’explorer une vaste gamme de stratégies de gestion des réservoirs compatibles avec la ressource en eau disponible. Les résultats des simulations permettent le calcul d’indicateurs de satisfaction des objectifs de gestion, notamment des objectifs antagonistes de production d’énergie et de soutien de crue. Les premières études ont porté sur l’optimisation de la gestion du barrage de Manantali (Mali). Afin de tester différents scénarios d’aménagement et d’évolution des demandes, des modèles originaux et novateurs sont actuellement élaborés pour simuler divers modes de gestion concertée de réservoirs, correspondant à plusieurs niveaux de décisions : (1) des décisions annuelles de stratégie sur l’ensemble du bassin, l’une des

plus sensibles étant la décision d’un soutien d’une crue annuelle ; pour aider ces décisions, différents travaux portent sur la prévision saisonnière d’écoulement à partir de modèles climatiques ; (2) des décisions tactiques de gestion concertée de réservoirs avec des tests d’optimisations sur des horizons décisionnels de quelques jours à plusieurs mois ; (3) des décisions journalières qui visent à optimiser les commandes des organes des différents ouvrages en utilisant des informations disponibles en temps réel.

Contacts : J.-C. Bader, jean-claude.bader@ird.fr et J.-C. Pouget, jean-christophe.pouget@ird.fr (UMR G-EAU)



► Carte du bassin du fleuve Sénégal avec les barrages actuels et en projet



◀ Pêcheurs dans la vallée du fleuve Sénégal près du lac de Guiers. © J.C. Pouget 2016



◀ Pêcheurs et pompage pour l'irrigation dans la vallée du fleuve Sénégal près de Podor. © J.C. Pouget 2014

Participation et concertation

Le rôle de la modélisation d'accompagnement dans les changements sociaux

Dès lors que l'on considère un objet d'étude comme un ensemble d'individus et de groupes en interaction entre eux et avec leur environnement qui a sa propre dynamique, alors le devenir de cet objet est impossible à prévoir. Cet objet forme un système plus ou moins organisé et dont l'organisation passera par différentes formes, certaines étant plus éphémères ou stables que d'autres. Le travail du scientifique s'inscrit dans ce contexte d'incertitude et vise à accompagner les processus de décision pour le changement vers de nouvelles formes d'organisation ou le maintien de la situation présente, si celle-ci est souhaitée par les individus et groupes sociaux. Pour accompagner les processus de décision, la modélisation d'accompagnement propose de faire dialoguer les objectifs et les savoirs de toutes les parties prenantes — dont celles des scientifiques — au moyen de méthodes et d'outils de modélisation et d'exploration des futurs (théâtre, jeux de rôles, simulations informatiques). Diverses expériences, en France, au Sénégal et au Bhoutan, entre autres, ont montré comment des groupes peuvent ainsi définir de nouvelles formes d'organisations (comités de gestion, lois, règles, occupation des sols, etc.) changeant leurs relations à l'environnement. Le suivi à long terme montre aussi, lorsque le contexte évolue, comment les groupes mobilisent la méthode et les outils sur des sujets nouveaux lorsque de nouvelles décisions collectives doivent être prises. L'unité propre de recherche (UPR) Green et le réseau ComMod travaillent depuis bientôt 20 ans

sur ce sujet, et proposent des méthodes, des formations, des outils à la démarche de modélisation d'accompagnement.

Contacts : F. Bousquet, francois.bousquet@cirad.fr
et W. Daré, william's.dare@cirad.fr (UPR Green)
Plus d'informations sur le réseau ComMod (Companion Modelling) :
www.commod.org



▲ Le jeu de rôles Bagrépoly au Burkina Faso (nov. 2016). © Farid Traoré

Modélisation d'accompagnement pour apprendre sur les interdépendances entre dynamiques des usages de l'eau et des territoires

Politiques sectorielles et choix de développement, chacune affecte la disponibilité, la qualité et les usages de l'eau sur un territoire. La compréhension des interdépendances entre dynamiques des usages de l'eau et des territoires est essentielle pour prévenir des inefficacités voire conflits éventuels. Les 'territoires hydrologiques' désignent les systèmes sociaux et écologiques constitués d'un espace approprié par des hommes en relation avec une(des) ressource(s) en eau, et mobilisant de multiples points de vue et interactions. Leur modélisation permet de produire des outils pour explorer leurs dynamiques sur divers scénarios. La modélisation d'accompagnement — en s'appuyant sur les systèmes multi-agents et jeux de rôles — permet de prendre en compte des

points de vue hétérogènes — à la fois d'experts et 'profanes' — et de les intégrer dans des outils de représentation compréhensibles et modifiables par tous.

Nous avons, par exemple, exploré les conséquences, en termes de risques sur l'approvisionnement en eau potable, de scénarios de choix d'intercommunalité, de politique d'urbanisation et de sécurisation de l'accès aux ressources*. Sur la base de modèles techniques, les acteurs ont critiqué l'absence de prise en compte d'enjeux de politique d'urbanisation pour les maires de communes en limite d'aire urbaine. Le processus de modélisation a pu ajouter ces éléments de décision dans la dynamique du territoire. Dans certains cas, pour comprendre ces modèles, les jeux de rôles proposent un format de représentation plus facile à mettre à l'épreuve. Les participants, à la fois observateurs et acteurs de la simulation, interviennent sur la représentativité des leviers à leur disposition dans l'action (cf. ci-contre). Ces démarches de modélisation collaborative questionnent les jeux de pouvoirs sous-jacents, les conditions d'usage des modèles produits, la prise en compte et la révélation des incertitudes. Même si ces méthodes peuvent se développer pour d'autres enjeux que ceux liés à l'eau, la multiplicité des usages, des ressources et des territoires de gestion, font des territoires hydrologiques un objet où le besoin pour ces méthodes se fait particulièrement sentir.

Contacts : O. Barreateau, olivier.barreateau@irstea.fr
et B. Bonté, bruno.bonte@irstea.fr (UMR G-EAU)

* Projet SURGE : Solidarité Urbain-Rural et Gestion de l'Eau



▲ Simulation interactive dans la municipalité de George en Afrique du Sud. © C. Simi

Gérer l'eau sans complexes : modéliser et simuler des systèmes complexes sans ordinateur

Des chercheurs de l'UMR G-EAU ambitionnent d'outiller la modélisation d'accompagnement pour la gestion intégrée de l'eau (cf. *article précédent* p. 64), afin d'en faciliter l'appropriation, la diffusion et l'utilisation. Le kit Wat-A-Game (WAG), produit en 2012, veut mettre la modélisation et la simulation participative à la portée de tous, en autonomisant les groupes d'acteurs et en réduisant l'intervention des experts. Il propose des éléments matériels et méthodologiques pour représenter, concevoir et simuler de façon analogique (avec des cartes et des billes) les bassins versants, leurs ressources et leurs dynamiques, leurs usagers et leurs pratiques, leurs gestionnaires, leurs règles et outils, sous forme de jeux de rôles. WAG comprend un kit d'initiation, une base méthodologique de

production par des acteurs de leurs propres modèles, une infrastructure informatique de structuration des connaissances nécessaires et de partage d'expérience, et une base de cas locaux (>80) consultables et parfois réutilisables.

Il existe une centaine d'applications dans une vingtaine de pays, allant de prototypes de démonstration jusqu'à des boîtes finalisées. WAG peut couvrir un large éventail de situations en termes d'échelles (de la communauté au grand bassin versant), de problématiques et de ressources (ressource en eau et pollution, mais aussi inondations, érosion, biodiversité, élevage...). Il postule la capacité de tous les acteurs à co-construire des

modèles de leur environnement et des effets de leurs actions, puis à en explorer les conditions de changement (nouvelles pratiques, régulations). C'est un élément du « pack » COOPLAAGE qui fournit un ensemble d'outils et de méthodes simples, robustes et facilement appropriables pour mettre en œuvre des ateliers participatifs de modélisation, de simulation, de planification, de suivi-évaluation. COOPLAAGE comprend également des dispositifs pour la planification participative, un outil pour la révélation et la discussion des principes de justice, et un cadre méthodologique pour le suivi-évaluation participatif. Un réseau d'animateurs formés aux outils de COOPLAAGE a été lancé en 2017 à l'occasion de la COP22.

Contacts : N. Ferrand, nils.ferrand@irstea.fr et G. Abrami, geraldine.abrami@irstea.fr (UMR G-EAU)

Plus d'informations :
www.watagame.info
<http://cooplanet.watagame.info/>



▲ *Session de modélisation au Sénégal avec WAG.*
© Géraldine Abrami

▶ *Le kit d'initiation de WAG (INI-WAG).*
© Benjamin Noury



Modélisation et simulation participative pour les questions de santé

Les zoonoses — maladies infectieuses transmises entre les animaux et l'homme —, les résistances aux médicaments et les pollutions environnementales posent aujourd'hui de graves problèmes de santé publique à l'échelle mondiale. Ces problèmes de santé sont fortement liés aux changements environnementaux et socioéconomiques globaux et aux transformations des systèmes de production à l'échelle des territoires. Dans ce contexte, la gestion de la santé devient complexe : elle doit être abordée en lien étroit avec la santé publique vétérinaire, l'agriculture et l'environnement. De nouvelles incertitudes apparaissent, et des acteurs non conventionnels entrent aux côtés des décideurs

classiquement chargés de la santé publique. Dans un tel contexte, la prise de décision est difficile. Il devient nécessaire d'utiliser des méthodes où l'ensemble des points de vue peuvent être explicités. La démarche de modélisation et de simulation participative intègre les connaissances hétérogènes de tous les acteurs concernés par un même problème. Elle permet de co-construire une représentation partagée du système étudié et de générer des scénarios, artefacts de futurs possibles. Elle révèle les incertitudes et permet ensuite de s'entraîner à les gérer, à prendre des décisions et partager les responsabilités. La modélisation et la simulation participative constituent une solution pragmatique pour mieux intégrer

la santé dans les politiques d'aménagement du territoire. Cette démarche mobilise différents outils, comme les jeux de rôles ou les simulations informatiques. Ces outils ont d'abord été développés pour la gestion des ressources renouvelables par le collectif ComMod. Le projet ComAcross (EuropeAid) a mis en œuvre cette démarche avec succès en l'adaptant aux questions de santé en Thaïlande, au Laos et au Cambodge.

Contacts : R. Duboz, raphael.duboz@cirad.fr et A. Binot, aurelie.binot@cirad.fr (UMR ASTRE)

Plus d'informations sur le Collectif ComMod :
www.commod.org

Projet ComAcross : www.onehealthsea.org/comacross

◀ *Une session de jeu de rôles avec des villageois au Cambodge pour la prévention et la recherche de nouvelles mesures de contrôle de deux encéphalites : l'encéphalite japonaise et le virus Nipah.*

© ComAcross EuropeAid project – Cirad 2017



La modélisation bayésienne participative pour éclairer les incertitudes entre acteurs sur le fonctionnement socio-écologique d'un agroécosystème

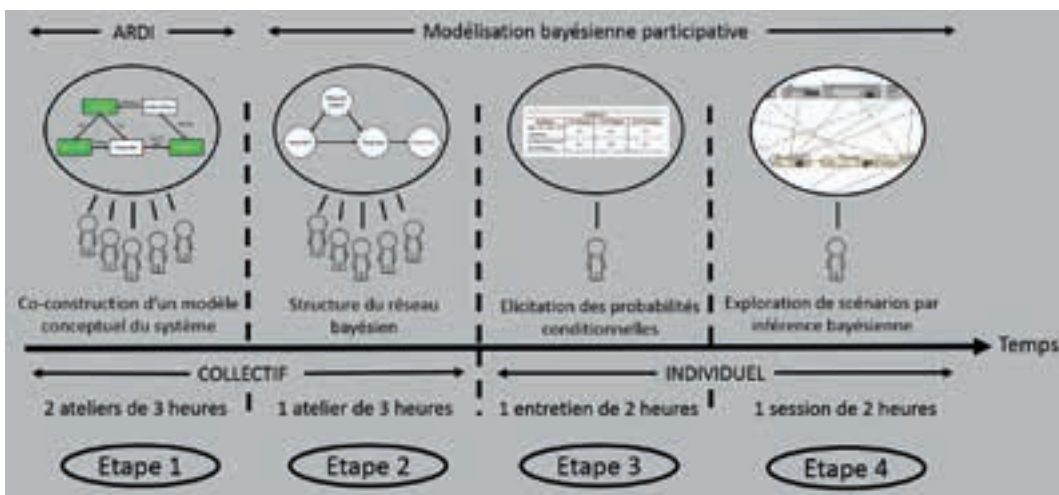
Les systèmes agricoles sont invités à se réinventer pour intégrer les enjeux écologiques. Hier, on a souvent réduit la complexité et privilégié des objectifs économiques par l'utilisation de produits chimiques et la mécanisation. Aujourd'hui, mobiliser les processus écologiques dans les systèmes agricoles implique d'intégrer cette complexité en tenant compte notamment des incertitudes écologiques sur les processus en jeu et des incertitudes sociales entre acteurs impliqués. En partenariat avec des acteurs scientifiques, techniques et agricoles de l'arboriculture du Tarn-et-Garonne, nous avons exploré ces incertitudes sociales et écologiques autour de la recherche d'alternatives aux pesticides par la régulation biologique avec des insectes auxiliaires. Lors d'ateliers collectifs puis individuels, nous avons facilité la réalisation par les acteurs eux-mêmes d'un modèle bayésien du système écologique et social impliqué dans cette problématique, ce type de modèle étant particulièrement adapté pour aborder les questions d'incertitudes. Plusieurs scénarios d'évolution ont été développés et analysés à travers différents paramétrages définis par plusieurs types d'acteurs. Il a ainsi été possible de mettre en regard les perceptions des divers acteurs vis-à-vis des incertitudes. En les comparant, nous avons pu montrer (i) les points de convergence ou d'ambiguïté entre acteurs vis-à-vis de leur compréhension du système dans lequel ils agissent et (ii) des voies d'avenir possibles vis-à-vis de la régulation biologique. Les perceptions partagées sont autant de bases de discussion et d'exploration

de voies d'innovations communes tant à l'échelle des exploitations individuelles qu'à celle du territoire. Les ambiguïtés peuvent, quant à elles, favoriser la discussion et la confrontation de la diversité des visions et des connaissances portées par les acteurs sur la complexité de leur système. La modélisation explicite des incertitudes socio-écologiques favorise ainsi la compréhension mutuelle entre acteurs et la mise en place de pratiques agricoles intégrant la complexité des écosystèmes.

Contacts : N. Salliou, nicolas.salliou@gmail.com, C. Barnaud, cecile.barnaud@inra.fr et C. Monteil, monteil@ensat.fr (UMR DYNAFOR)



▲ Atelier individuel d'élicitation des probabilités pour paramétrer le réseau bayésien de chaque participant. L'usage de cartes facilite la discussion et l'expression de probabilités parfois délicates lorsque de nombreuses variables sont impliquées. © Nicolas Salliou /UMR DYNAFOR



◀ Principales étapes du processus de modélisation bayésienne participative. ARDI (Acteurs, Ressources, Dynamiques et Interactions) est une méthode participative pour co-construire des modèles conceptuels de systèmes socio-écologiques. D'après Salliou N., 2017. La gestion paysagère des ravageurs : exploration des verrous et leviers d'une innovation agroécologique par la modélisation participative. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.



◀ Variables co-construites du réseau bayésien. Variables liées au paysage (bleu clair), aux pratiques agricoles (vert), aux facteurs sociaux (rouge), aux populations d'insectes (bleu foncé), aux facteurs abiotiques (violet) et économiques (jaune). D'après Salliou N., 2017. La gestion paysagère des ravageurs : exploration des verrous et leviers d'une innovation agroécologique par la modélisation participative. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.

Les jardins collectifs urbains : de précieux terrains d'exploration de la transdisciplinarité recherche-formation sur les sujets Environnement-Santé

La transition écologique se construit dans les dynamiques de territoires dans lesquelles la société civile joue un rôle majeur, particulièrement sur le terrain des agricultures urbaines (AU). Le boom de l'AU — qu'il faut associer aux préoccupations sociales pour le développement durable et la nature et aux crises de confiance alimentaire — remet en question « les formes de production alimentaire ainsi que leur localisation ». La ville devient un territoire « jardiné », incrusté de petits terrains potagers ou de vastes ensembles maraichers. Or, à l'échelle mondiale, les hommes résident majoritairement dans les villes (80 % en 2050, selon les projections) et 40 % de la croissance urbaine se fait dans les bidonvilles (FAO, 2015 ; WEF, 2015).

La prise de conscience par les urbains de l'importance cruciale des lieux d'humanité (tels les jardins collectifs), d'une alimentation durable et de la préservation de la biodiversité, participe au développement de l'AU comme vecteur d'écologie démocratique. Cependant, des pollutions sont souvent observées dans les zones urbaines très anthropisées, avec des conséquences sur la qualité des cultures alimentaires. En raison de la complexité des mécanismes biogéochimiques impliqués dans le transfert de substances dans les écosystèmes terrestres et de la multiplicité des scénarios d'exposition, les scientifiques peuvent rarement répondre simplement aux questions concernant l'exposition humaine aux polluants dans des contextes tels que les jardins urbains. Promouvoir le développement de méthodologies sociotechniques pour éviter, réduire et réparer l'impact des pollutions urbaines est donc un enjeu scientifique

et sociétal important qui implique une collaboration opérationnelle entre chercheurs, citoyens et gestionnaires. En effet, la réglementation environnementale reste encore lacunaire. Le Réseau-Agriville ambitionne de promouvoir une AU en lien avec la transition écologique en favorisant, en particulier, une dynamique innovante et inclusive entre les différents acteurs de l'université, de l'espace public et des entreprises.

Contact : C. Dumat (UMR CERTOP/INP-ENSAT/Réseau-Agriville), camille.dumat@ensat.fr

Collaborateurs : L. Sochaki (CERTOP/Réseau-Agriville), M. Messina (Jardins collectifs de Monlong), D. Dupouy (Jardins collectifs de Tournefeuille), E. Schreck (UMR GET)

Plus d'informations sur le Réseau-Agriville : <http://reseau-agriville.com/>



◀ Les diverses fonctions de l'AU.
D'après Dumat C., 2017.

La plateforme de simulation Cormas et ses formations pour faire vivre une communauté de pratique

Dans le but de faire découvrir la simulation multi-agent à des chercheurs travaillant dans le domaine de la gestion des ressources renouvelables, pas forcément spécialistes de la modélisation, l'UPR Green a conçu à la fin des années 1990 une formation (2 semaines) sur les systèmes multi-agents (SMA) en regard d'autres approches de modélisation utilisées dans ce domaine. Partant des automates cellulaires et passant par la théorie des jeux, une progression vers les SMA était proposée. Cette formation privilégiait les démonstrations et manipulations de modèles de simulation multi-agent implémentés avec la plateforme Cormas, et invitait les participants à travailler en petits groupes pour développer, avec Cormas, des prototypes appliqués à leur problématique de recherche. Une bibliothèque de modèles didactiques permettait d'illustrer les principaux concepts enseignés (par ex. la modélisation de la diffusion d'un feu de forêt contre lequel lutte une



▲ Discussion entre les participants pour former des groupes de 2 à 4 personnes, selon la proximité des thématiques de recherche, pour concevoir ensemble un prototype de modèle multi-agent. © Pierre Bommel

brigade de pompiers). Au cours des années 2000, sont apparues en France de nouvelles plateformes génériques, portées par des chercheurs intéressés par des applications dans le domaine de la gestion de l'environnement et participant aux réflexions sur la modélisation d'accompagnement. Chacune de ces plateformes aborde le développement de modèles de simulations multi-agents selon des angles spécifiques :

- Mimosa couvre toutes les phases, depuis la modélisation conceptuelle jusqu'à l'implémentation.
- GAMA (cf. p. 50) met l'accent sur le couplage avec les systèmes d'information géographique et repose sur une architecture permettant de prendre en charge le multi-niveau.
- NetLogo, initialement conçue comme un outil de pédagogie active pour enseigner la complexité, est devenue la plateforme de référence au niveau international.

L'idée d'adapter la formation, initialement basée sur une seule plateforme, en proposant l'apprentissage de plusieurs plateformes s'est imposée. Depuis 2011, les plateformes Cormas, Netlogo et Mimosa sont enseignées, GAMA remplaçant Mimosa depuis 2013. Des formateurs de différentes institutions animent cette formation délivrée chaque été à Montpellier.

Contact : C. Le Page (UPR Green), christophe.le_page@cirad.fr
Plus d'informations sur l'École d'été MISS-ABMS - Multi-platform International Summer School on Agent-Based Modelling & Simulation for Renewable Resources Management : www.agropolis.org/miss-abms



Nouveaux modèles pour la décision

Décision pour l'agroécologie à l'échelle du territoire

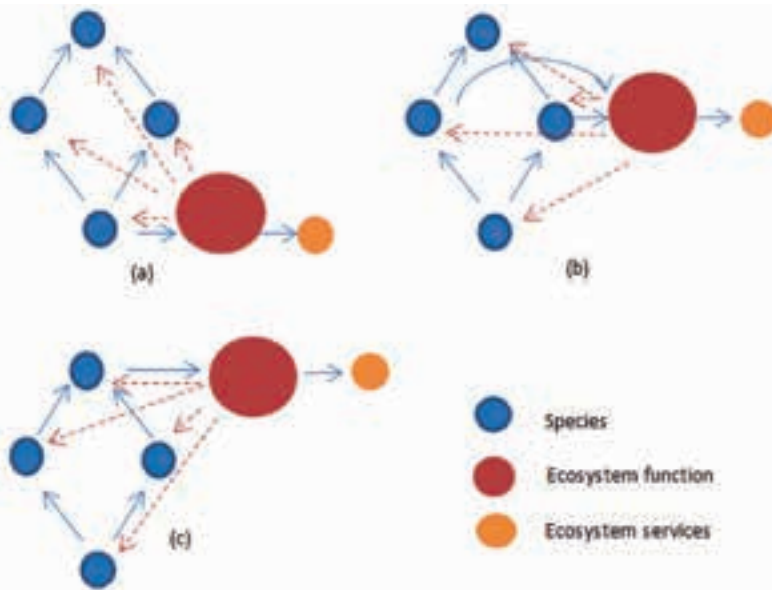
L'équipe « Modélisation des agroécosystèmes et décision » (UR Inra-MIAT) conduit des recherches en statistiques, informatique et économie et les met en œuvre en collaboration avec ses partenaires agronomes et écologues pour la modélisation et la simulation de problèmes de gestion agro-écologique à l'échelle du territoire. Elle conçoit également des outils mathématiques, informatiques et « participatifs » pour la conception de stratégies innovantes en agroécologie. Les questions de gestion agroécologique que nous considérons avec nos partenaires portent sur la gestion des services écosystémiques à l'échelle du territoire, en lien avec l'agriculture, la foresterie, etc., ainsi que sur la recherche de compromis entre ces services écosystémiques. À cette fin, l'équipe développe :

1. Des modèles de comportement décisionnel des agriculteurs ou gestionnaires forestiers en contexte incertain peuvent prendre en compte (i) l'attitude face au risque des décideurs, (ii) un comportement de type « rationalité limitée » ou (iii) la limitation des ressources biophysiques et techniques. Les approches concernées sont issues des disciplines de l'économie et de l'intelligence artificielle.
2. Des outils de simulation permettent d'étudier ou d'optimiser des processus décisionnels complexes, à l'échelle du territoire, impliquant éventuellement de multiples agents interagissant. Ces travaux en informatique et mathématiques appliquées trouvent leur incarnation dans les environnements de simulation (spatiale et multi-agent) que nous co-développons (*Virtual Laboratory Environment** et plateforme GAMA, cf. p. 50).
3. Des travaux à l'interface des modèles graphiques probabilistes et de l'intelligence artificielle, concernent la modélisation et la résolution approchée de problèmes de décision séquentielle dans l'incertain en contexte structuré. Ces travaux visent la recherche de compromis entre services écosystémiques et biodiversité à l'échelle du territoire, ou la prise en compte des interactions écologiques pour la conservation de communautés d'espèces. Cette problématique nécessite le développement de méthodes de résolution originales et puissantes, permettant de faire face à des problèmes de décision dont la taille rend inapplicables les outils de résolution classiques.

Contact : R. Sabbadin (UR Inra-MIAT), regis.sabbadin@inra.fr
Plus d'informations : <https://mia.toulouse.inra.fr/Catégorie:MAD>

* www.vle-project.org

◀ *Identification d'un réseau écologique et des services écosystémiques fournis par une communauté d'espèces, utilisation pour la gestion.* © MAD/MIAT



Épuration de ressources hydriques en circuit fermé

La dépollution biologique, comme elle est réalisée en stations d'épuration, met en œuvre des micro-organismes qui dégradent les substances indésirables qu'ils utilisent pour leur croissance. Dans les milieux naturels (lacs, étangs, réservoirs, etc.), on ne peut se permettre d'introduire ces micro-organismes car ils se développeraient au détriment d'autres formes de vie en consommant notamment l'oxygène, et il serait alors difficile de les extraire sans vider la ressource. On peut néanmoins pomper l'eau polluée pour la traiter en continu dans une unité de traitement externe (bioréacteur) afin de la réintroduire épurée, tout en conservant le volume de la ressource constant. On recherche ainsi un compromis entre vitesse et qualité de traitement, en agissant sur les débits et le positionnement des pompes, pour traiter la ressource en temps raisonnable. L'hydrodynamique de la ressource soumise aux débits de pompage et de rejet (régie par les équations de Navier-Stokes) est complexe et dépend de la géométrie de la ressource et de la diffusivité du polluant, ce qui rend le problème d'optimisation

du temps de traitement extrêmement difficile. Une méthode mariant simulations numériques d'équations aux dérivées partielles et modèles simplifiés de représentations de l'hétérogénéité spatiale a été mise au point, permettant :

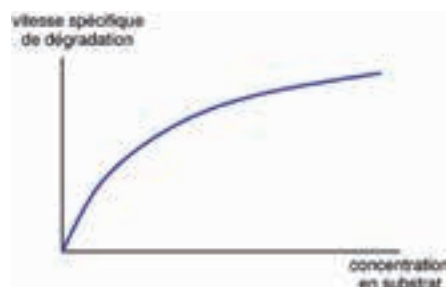
- d'une part de trouver un réglage optimal du débit des pompes qui s'adapte automatiquement au cours du temps aux mesures de pollution aux points de pompage ;
- et d'autre part de choisir les emplacements les plus efficaces des pompes.

Cette méthode comprend une première phase de calibration du modèle réduit à partir d'un modèle plus complexe prenant en compte la géométrie du milieu. La seconde phase, opérationnelle, utilise les outils de la commande optimale, et fournit une estimation du temps de traitement optimisé.

Contacts : J. Harmand (UPR LBE), jerome.harmand@inra.fr, A. Rapaport (UMR MISTEA), alain.rapaport@inra.fr, A. Rousseau (Inria-Lemon), antoine.rousseau@inria.fr



▲ **Principe du traitement en circuit fermé.**
 D'après Barbier et al. J. Scientific Computing. 68:3 (2016).



◀ **Exemple de vitesse de dégradation de micro-organismes en fonction de la concentration en substrat désirée en sortie de l'unité de traitement.**

Modélisation spatio-temporelle par réseaux bayésiens des phénomènes de crues éclair

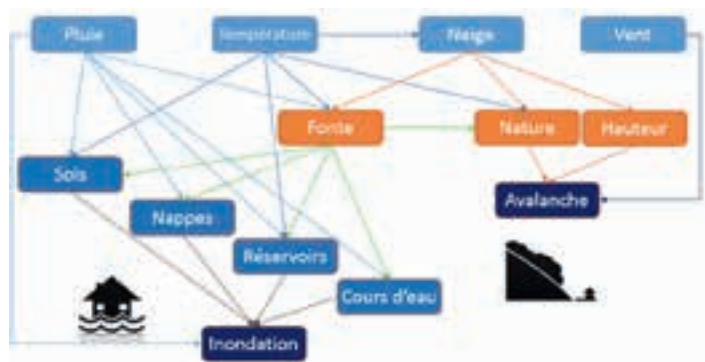
Les crues rapides comprennent une part d'incertitude liée aux difficultés d'observations, de prévision ainsi qu'à la mauvaise connaissance des processus mis en jeu. Il s'avère essentiel aujourd'hui d'améliorer la connaissance actuelle de ce risque par l'utilisation contemporaine de modèles analytiques et empiriques dans un même contexte permettant de mieux appréhender la part aléatoire liée à l'occurrence et au niveau atteint par certaines variables clés dans la réalisation de l'événement redouté. Dans cette optique, des modèles analytiques de débit ont été développés, basés sur la physique des phénomènes mis en jeu. Ils ont le mérite de simuler de façon satisfaisante les processus induits mais ne permettent pas d'appréhender toute la complexité de couplage des variables mises en jeu. À l'inverse, des modèles probabilistes existent mais, du fait de la rareté des événements, ne profitent que très peu du retour d'expérience pour l'établissement des informations représentatives des phénomènes stochastiques.

Pour combler ce vide, l'ambition du projet MERCI (Modèle causal pour l'Évaluation des Risques de Crues et d'Inondations) qui réunit l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (UMR IMFT) et le Laboratoire Génie de Production (EA LGP) de l'INPT-ENIT, est le développement d'un modèle causal spatio-temporel pour l'explication et la probabilisation des événements redoutés à des fins de diagnostic et de pronostic. Le travail de modélisation est basé sur les réseaux bayésiens, support au rapprochement entre modèles analytique et statistique. Une crue étant un phénomène dont l'intensité varie au cours du temps, les réseaux bayésiens dynamiques qui intègrent la dimension temporelle sont utilisés. Finalement, afin de caractériser la dimension spatiale du phénomène, le modèle temporel élémentaire est utilisé comme brique générique de modélisation dans une logique orientée objet, instancié en fonction de la zone modélisée et ordonné temporellement selon la chronologie de déroulement du phénomène.

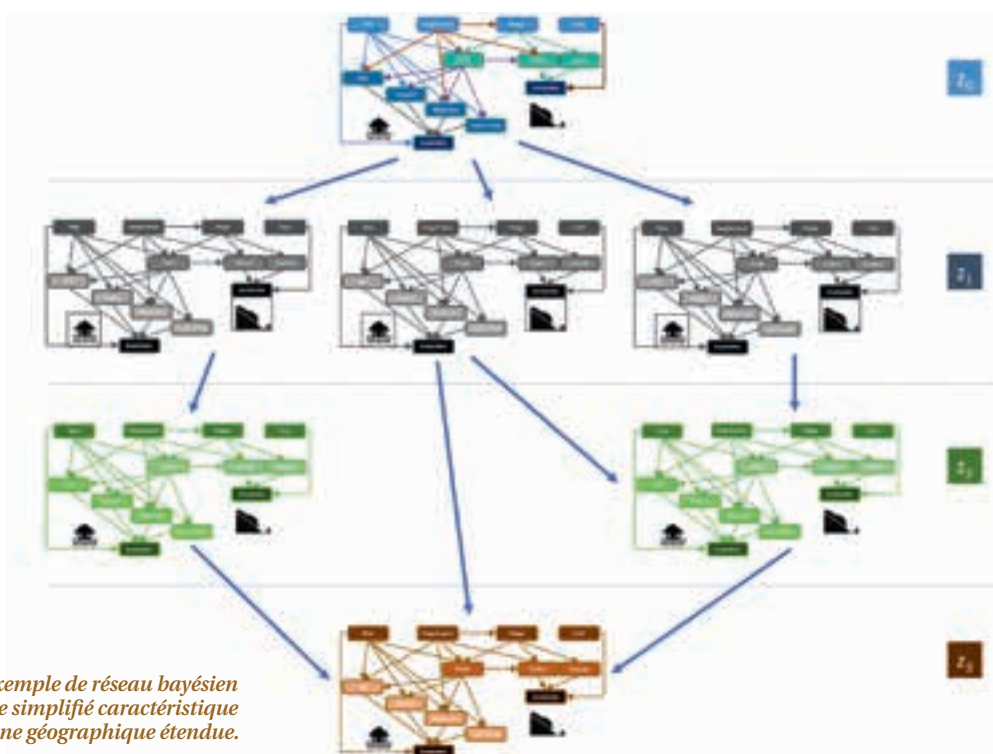
Contacts : Q. Liu (EA LGP), quan.liu@enit.fr, A.Tchangani (EA LGP), ayeley.tchangani@enit.fr, H. Roux (UMR IMFT), helene.roux@imft.fr, F.Péres (EA LGP), francois.peres@enit.fr



▲ *Modèle causal pour l'évaluation des risques de crues et d'inondations.*



▲ *Exemple de réseau bayésien simplifié caractéristique d'une zone géographique élémentaire.*



► *Exemple de réseau bayésien dynamique simplifié caractéristique d'une zone géographique étendue.*

Les structures fédératives de recherche en lien avec les systèmes complexes

XSYS : Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse



L'XSYS réunit des acteurs de Toulouse et de la région Occitanie aux expertises complémentaires pour bâtir des approches méthodologiques transversales afin de travailler sur la complexité inhérente aux grands enjeux sociétaux.

La plupart des domaines scientifiques incluent la complexité dans son propre champ d'expertise et chacun avec sa propre approche. L'XSYS ambitionne de mettre cette diversité au service de la complexité en travaillant à des pratiques plus intégrées entre expérimentations et modèles, revisitant l'armature théorique des sciences de la complexité. Il s'agit de mêler connaissances expertes et approches formelles pour analyser, comprendre et agir dans trois thèmes transversaux de recherche : Réseaux Dynamiques, Déplacements Collectifs et Mobilités, Adaptation aux Risques.

L'XSYS vise à développer la recherche scientifique interdisciplinaire, l'innovation partenariale, la formation et le partage de connaissances sur les systèmes complexes et leurs applications. Les concepts d'émergence, d'interactions multi-échelles, de rétroactions, de cascades, de bifurcations, de dynamiques non linéaires, d'influences stochastiques de l'environnement, sont finement étudiés au sein de projets thématiques.

L'XSYS coordonne une dynamique qui s'appuie sur un cœur de 20 laboratoires et plus de 200 chercheurs, ainsi que sur 17 structures non académiques (PME, associations, collectivités).

Contact : B. Jouve, contact@xsys.fr

Plus d'informations :

<http://xsys.fr/>

Twitter : [@xsys_toulouse](https://twitter.com/xsys_toulouse)

LinkedIn : XSYS - Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse

Facebook : [@XSYSTlse](https://www.facebook.com/XSYSTlse)

Institut Convergences Agriculture Numérique : #DigitAg



#DigitAg est l'un des cinq projets d'Instituts Convergences retenus par l'Agence Nationale de la Recherche dans la première vague d'appel à proposition en juillet 2016. Il est le seul situé en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée. Il rassemble plus de 300 membres provenant de 17 partenaires publics et privés :

- 4 organismes de recherche : Irstea, Inra, Cirad et Inria
- 3 établissements d'enseignement supérieur : UM, Montpellier SupAgro et AgroParisTech
- 2 structures d'innovation et de transfert : ACTA et AxLR
- 8 entreprises : ITK, SMAG, Vivelys, IDATE, Fruition Sciences, Peralenc, TerraNIS et Agriscope

Il a pour ambition de devenir une référence mondiale en agriculture numérique. Son objectif est de développer les socles de connaissances préparant le déploiement de l'agriculture numérique en France et dans les pays du Sud. En s'appuyant sur une recherche interdisciplinaire en agronomie, sciences numériques, sciences économiques et sociales, sciences de gestion, droit, #DigitAg cherche à relever deux défis sociétaux majeurs : produire mieux en agriculture et mieux inclure l'agriculture dans la société. #DigitAg inclut une *Graduate School* qui propose 24 Masters et accueille 300 étudiants chaque année. Des dispositifs éducatifs innovants sont mis en œuvre : l'Observatoire des usages de l'agriculture numérique, le Mas numérique, la Chaire AgroTIC, des formations en ligne ouvertes à tous (MOOC), un hackathon annuel... Enfin, avec huit entreprises partenaires et une société d'accélération du transfert de technologie (SATT), #DigitAg affiche une volonté d'innovation : formation à l'entrepreneuriat, détection précoce des innovations et mise à disposition de 10 ans de développement informatique pour accélérer le transfert de technologie.

Chiffres clés

- 9,9 millions d'euros pour son fonctionnement sur 7 ans
- 25 unités et UMR
- 56 co-financements de thèses
- 50 thèses labellisées
- 150 bourses de Master
- 18 années de post-docs
- 72 mois d'accueil pour les chercheurs de haut niveau
- 120 mois de développement informatique

Contact : P. Péré, contact@hdigitag.fr

Plus d'informations : www.hdigitag.fr/fr

Les laboratoires d'excellence, LabEx



Agro : Agronomie et développement durable

Le LabEx Agro (Programme d'Investissements d'Avenir 2011-2019) est centré sur la plante, l'agriculture, l'alimentation et le développement durable. Porté par la Fondation de Coopération Scientifique Agropolis Fondation, il réunit 41 unités de recherche et 1 500 scientifiques de 12 établissements publics. Il présente un continuum de compétences pluridisciplinaires — sciences biologiques, sciences de l'ingénieur, sciences humaines et sociales — allant de l'étude des gènes et de la plante jusqu'à la production, la transformation et l'utilisation finale des plantes. Il porte une expertise reconnue sur un grand nombre d'espèces végétales tempérées, méditerranéennes et tropicales et les systèmes de production et transformation correspondants. Les compétences scientifiques du réseau s'organisent en cinq domaines scientifiques :

- Génétique, génomique, écophysiologie, amélioration des plantes
- Interactions biotiques des plantes, protection intégrée des cultures
- Gestion des agro-écosystèmes
- Technologies de transformation, qualité des produits alimentaires et non alimentaires
- Interactions agriculture – société, gestion sociale de l'innovation

Le LabEx Agro rassemble ainsi un spectre large de compétences scientifiques, original à l'échelle internationale. Il aborde des enjeux de société mobilisant des approches de systèmes complexes : préparer les plantes cultivées de demain, développer les conditions d'adaptation de l'agriculture au changement climatique, comprendre les interactions entre filières, territoires et développement durable...

Contact : P. Kosuth, kosuth@agropolis.fr

Plus d'informations : www.agropolis-fondation.fr



CeMEB : Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité

Le LabEx CeMEB regroupe dix unités de recherche de Montpellier-Perpignan (AMAP, CBGP, CEFÉ, Eco&Sols, ECOTRON, IHPE, ISEM, CEE-M, MARBEC, MIVEGEC). Les recherches portent sur la dynamique et le fonctionnement de la biodiversité et des écosystèmes dans un contexte de changements environnementaux marqués, induits en particulier par les activités humaines. Un objectif important est de prévoir les conséquences biologiques des changements planétaires à l'aide de scénarios, et d'anticiper l'évolution des services écosystémiques et des sociétés humaines. Couvrant tous les types d'écosystèmes (aussi bien terrestres que marins) et d'organismes vivants, ces unités de recherche s'intéressent particulièrement à la biodiversité « sauvage » via de nombreux programmes de recherche à long terme sur le terrain. Les approches combinent observations, expérimentations et modélisations, et s'appuient sur des outils de haut niveau (par ex., Ecotron Européen de Montpellier) ou le site instrumenté de Puéchabon, ainsi que sur des plateformes technologiques communes (par ex., (épi)génomique ou bioinformatique). Les approches sont fermement interdisciplinaires intégrant ainsi parfaitement la notion de systèmes complexes. CeMEB participe à l'organisation et à la mise en cohérence de la recherche sur la biodiversité à Montpellier, en soutenant financièrement la recherche (par ex., financement de projets de recherche, allocations postdoctorales...). CeMEB développe par ailleurs des activités de transfert vers le monde socio-économique.

Contact : P. Jarne, philippe.jarne@cefe.cnrs.fr

Plus d'informations : www.labex-cemeb.org/fr



NUMEV : Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant

Le LabEx NUMEV, labélisé en 2011 dans le cadre du PIA1, est issu de l'organisation de la communauté MIPS (Mathématiques, Informatique, Physique, Systèmes) de l'UM pour aborder des grands défis sociétaux dans le domaine des sciences formelles et du numérique en interface avec les sciences de la vie, de la santé et de l'environnement. NUMEV favorise l'émergence de programmes de recherche innovants dans les domaines de la modélisation, de l'adéquation de ces modèles avec le monde physique, et aux méthodes de représentations et d'extractions de données en y associant les aspects algorithmiques et computationnels. La construction de projets intégrés autour de l'observation

de l'environnement, l'assistance et la santé des personnes, modélisation (mathématique, physique et informatique) des génomes permettent de répondre à des défis sociétaux complexes et fondamentaux. Certains projets intégrés ont évolué en projets étendus qui visent une structuration forte des activités de recherche sur le site de Montpellier et un rayonnement international. NUMEV lie également recherche et formation en soutenant les projets de recherche de jeunes chercheurs, des nouvelles formations universitaires, des écoles internationales et des initiatives valorisant le travail scientifique étudiant. Enfin, le LabEx opère constamment entre les mondes académique et socio-économique en soutenant plusieurs projets de création d'entreprises dont certains ont fait l'objet de programmes de maturation avec la SATT AxLR. Le LabEx, regroupant six UMR, des équipes Inria et une équipe d'accueil (EA), se situe à la croisée d'activités et de compétences pluridisciplinaires, fournissant ainsi un outil de développement et de structuration efficace des activités scientifiques de la communauté MIPS aux interfaces avec les sciences de l'environnement et du vivant.

Contacts : A. Parmeggiani et L. Torres, numev-direction@umontpellier.fr
Plus d'informations : www.lirmm.fr/numev



SMS : Structurations des Mondes Sociaux

Le LabEx SMS est parvenu à constituer un pôle de sciences sociales dans la région toulousaine réunissant neuf unités de recherche (histoire, géographie, économie politique, sociologie, ethnologie, psychologie sociale, sciences de l'information et de la communication, science politique), 450 permanents et environ 300 doctorants autour de 11 opérations de recherche, trois ateliers méthodologiques, des instances de recherche collaborative et de diffusion des connaissances et un réseau de masters. L'expression « structurations des mondes sociaux » est une façon de renouveler l'approche de ce que l'on appelait dans le passé les « structures sociales » en mettant l'accent sur les dynamiques et en abordant les phénomènes sociaux par les réseaux de relations interpersonnelles, les dispositifs techniques, les règles et normes sociales, et les territoires.

Contacts : M. Grossetti, Michel.Grossetti@univ-tlse2.fr et C. Bauza, christine.bauza@univ-tlse2.fr

Plus d'informations : <http://sms.univ-tlse2.fr>



TULIP, vers une théorie unifiée des interactions biotiques : rôle des perturbations environnementales

Le LabEx TULIP vise à développer une théorie globale des interactions entre organismes, afin d'étudier leurs rôles dans l'adaptation des organismes vivants aux changements environnementaux. Regroupant sept unités d'excellence dans les domaines des Agrobiosciences et de l'Environnement à Toulouse et à Perpignan, il représente un potentiel de recherche d'environ 600 personnes appartenant à l'Inra, au CNRS, à l'UT3, l'INPT-ENSAT et l'UPVD, tous statuts confondus. En se basant sur des approches multidisciplinaires (biologie, écologie, génétique, modélisation...) impliquant des organismes microbiens, végétaux ou animaux sur des modèles expérimentaux à grande échelle, et en les couplant à des approches théoriques, les chercheurs du LabEx proposent des prédictions sur l'évolution des ressources et travaillent à apporter, à terme, des solutions aux problèmes qui, prochainement, nous impacteront. En ce sens, la communauté TULIP explore la complexité des interactions biotiques à diverses échelles (du gène à l'écosystème) et dépasse ainsi les frontières thématiques entre sciences de l'environnement et biologie intégrative végétale, en abordant un large spectre de questions tout en établissant des liens étroits entre les différentes dimensions abordées et en utilisant des concepts partagés. Au-delà des activités de recherche, le LabEx TULIP a également vocation à développer des formations (école d'été, création de Masters), et à promouvoir l'innovation.

Contact : D. Roby, dominique.robby@inra.fr

Plus d'informations : www.labex-tulip.fr



Le LabEx EpiGenMed (From genome and epigenome to molecular medicine) soutient également des activités de modélisation dans le vivant et l'environnement.

Contact : contact@epigenmed.fr

Plus d'informations : www.epigenmed.fr

Thématiques couvertes par les structures de recherche

(Mai 2018)

Les principales structures de recherche apparaissant dans le texte de ce dossier sont consignées dans le tableau ci-dessous. La couleur vert foncé ■ indique une thématique dans

laquelle une structure développe principalement ses activités, le vert clair ■ une thématique dans laquelle elle est également impliquée.

Chapitre 1. Systèmes complexes, collecte et gestion des données

- 1.1. Récolte des données
- 1.2. Mise en sens des données
- 1.3. Mise à disposition : accessibilité et interopérabilité des données

Chapitre 2. Compréhension et analyse des systèmes complexes

- 2.1. Dynamique des organismes
- 2.2. Dynamique des populations
- 2.3. Dynamique des écosystèmes
- 2.4. Gestion des territoires

Chapitre 3. Modes d'utilisation de l'approche « systèmes complexes »

- 3.1. Usage des observatoires
- 3.2. Aide à la décision multicritère
- 3.3. Participation et concertation
- 3.4. Nouveaux modèles pour la décision

Structures de recherche	Nombre de scientifiques	Chapitre 1			Chapitre 2				Chapitre 3			
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
Centre LGI2P • Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production (IMT Mines Alès) Directeur : Jacky Montmain, jacky.montmain@mines-ales.fr http://lgi2p.mines-ales.fr	23							■		■		
CERFACS • Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (Airbus/CNES/EDF/Météo France/ONERA/Safran/Total) Directrice : Catherine Lambert, catherine.lambert@cerfacs.fr www.cerfacs.fr	106						■					
CINES • Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur (MESRI) Directeur : Francis Daumas, daumas@cines.fr www.cines.fr	18	■	■	■						■		
EA LGP • Laboratoire Génie de Production (ENIT) Directeur : Jean Denape, jean.denape@enit.fr www.lgp.enit.fr/fr/lgp.html	55	■	■							■	■	■
Équipe-projet Virtual Plants • Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria/Cirad/Inra) Responsable : Christophe Godin, christophe.godin@inria.fr www.inria.fr/equipes/virtual-plants	10	■	■	■	■					■		
IBC • Institut de Biologie Computationnelle (UM/CNRS/Inra/Montpellier SupAgro/IRD/Cirad/Inserm/Inria) Directeur : Éric Rivals, rivals@lirmm.fr www.ibt-montpellier.fr	119				■							
OSU OREME • Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement (UMI/CNRS/IRD/Irstea) Directeur : Éric Servat, eric.servat@umontpellier.fr www.oreme.org	4	■	■	■	■	■	■	■		■		
UMI UMMISCO • Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes (IRD/UPMC/UCA/UCAD/Univ. Yaoundé I/USTH) Directeur : Jean-Daniel Zucker, jean-daniel.zucker@ird.fr www.ummisco.fr	75					■						
UMR AGAP • Amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales (Cirad/Inra/Montpellier SupAgro) Directeur : Patrice This, diragap@cirad.fr https://umr-agap.cirad.fr	191				■							
UMR AGIR • Agroécologie - Innovations - Territoires (Inra/INPT) Directeur : Jacques-Eric Bergez, Jacques-Eric.Bergez@inra.fr www6.toulouse.inra.fr/agir	60							■			■	

Structures de recherche	Nombre de scientifiques	Chapitre 1			Chapitre 2				Chapitre 3			
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
UMR AMAP • botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations (Cirad/CNRS/Inra/IRD/UM) Directeur : Thierry Fourcaud, diramap@cirad.fr http://amap.cirad.fr/fr/index.php	45											
UMR AMIS • Laboratoire d'anthropologie moléculaire et imagerie de synthèse (CNRS/UT3) Directeur : Éric Crubézy, eric.crubezy@univ-tlse3.fr http://amis.cnrs.fr	28											
UMR ASTRE • Animal, Santé, Territoires, Risques & Écosystèmes (Cirad/Inra) Directeur : Thierry Lefrançois, dir.astre@cirad.fr https://umr-astre.cirad.fr	74											
UMR B&PMP • Biochimie et physiologie moléculaire des plantes (CNRS/Inra/Montpellier SupAgro/UM) Directeur : Alain Gojon, alain.gojon@inra.fr www.l.montpellier.inra.fr/ibip/bpmp/index.htm	50											
UMR CBGP • Centre de Biologie pour la Gestion des Populations (Inra/IRD/Cirad/Montpellier SupAgro) Directrice : Flavie Vanlerberghe, dircbgp@supagro.inra.fr www.l.montpellier.inra.fr/CBGP	34											
UMR CEE-M • Centre d'Économie de l'Environnement de Montpellier (CNRS/Inra/Montpellier SupAgro/UM) Directeur : Brice Magdalou, brice.magdalou@univ-montpl.fr www.cee-m.fr	31											
UMR CEFÉ • Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CNRS/UM/UPVM/IRD/Montpellier SupAgro/Inra/EPHE) Directeur : Richard Joffre, direction@cefe.cnrs.fr www.cefe.cnrs.fr	89											
UMR CERTOP • Centre d'Étude et de Recherche Travail Organisation Pouvoir (UT2J/CNRS/UT3) Directrice : Marie-Gabrielle Suraud, marie-gabrielle.suraud@iut-tlse3.fr http://certop.cnrs.fr	139											
UMR CESBIO • Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (UT3/CNES/CNRS/IRD) Directeur : Laurent Polidori, laurent.polidori@cesbio.cnes.fr www.cesbio.ups-tlse.fr	58											
UMR CNRM • Centre National de Recherches Météorologiques (Météo France/CNRS) Directeur : Marc Pontaud, marc.pontaud@meteo.fr www.umr-cnrm.fr	87											
UMR DIMNP • Dynamique des Interactions Membranaires Normales et Pathologiques (CNRS/UM) Directeur : Georges Lutfalla, georges.lutfalla@umontpellier.fr www.dimnp.univ-montp2.fr	55											
UMR DYNAFOR • Dynamiques et écologie des paysages agriforestiers (Inra/Toulouse INP) Directeur : Marc Deconchat, marc.deconchat@inra.fr www.dynafor.fr	25											
UMR Eco&Sols • Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols & agro-écosystèmes (Montpellier SupAgro/Cirad/Inra/IRD) Directeur : Jean-Luc Chotte, eco-sols@ird.fr www.umr-ecosols.fr	53											
UMR ESPACE-DEV • Espace pour le développement (IRD/UM/Univ. des Antilles/Univ. de Guyane/Univ. Réunion) Directrice : Frédérique Seyler, espace-dev@ird.fr www.espace-dev.fr	52											
UMR G-EAU • Gestion de l'eau, acteurs, usages (AgroParisTech/ Cirad/IRD/Irstea/Montpellier SupAgro) Directeur : Olivier Barreteau, olivier.barreteau@irstea.fr https://g-eau.fr	60											
UMR GEODE • Géographie de l'Environnement (CNRS/UT2J) Directeur : Didier Galop, Didier.galop@univ-tlse2.fr http://w3.geode.univ-tlse2.fr/index.php	37											
UMR GM • Géosciences Montpellier (CNRS/UM/Université des Antilles) Directeur : Benoît Ildefonse, dirgm@gm.univ-montp2.fr www.gm.univ-montp2.fr	80											
UMR GRED • Gouvernance, Risque, Environnement, Développement (IRD/UPVM) Directeur : Bernard Moizo, gred@ird.fr www.gred.ird.fr	45											
UMR HSM • HydroSciences Montpellier (CNRS/IRD/UM) Directeur : Patrick Seyler, direction@msem.univ-montp2.fr, elise.deme@umontpellier.fr www.hydrosciences.org	55											
UMR IMFT • Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (CNRS/Toulouse INP/UT3) Directeur : Éric Climent, direction@imft.fr www.imft.fr	83											
UMR IRIT • Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (CNRS/INPT/UT3/UT Capitole/UT2J) Directeur : Michel Daydé, Michel.Dayde@irit.fr www.irit.fr	320											

Structures de recherche	Nombre de scientifiques	Chapitre 1			Chapitre 2				Chapitre 3			
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
UMR ISE-M • Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier (Cirad/CNRS/IRD/UM/EPHE) Directrice : Agnès Mignot, dirisem@univ-montp2.fr www.isem.univ-montp2.fr	130											
UMR ITAP • Information-Technologies-Analyse environnementale-Procédés agricoles (Irstea/Montpellier SupAgro) Directeur : Tewfik Sari, tewfik.sari@irstea.fr http://itap.irstea.fr	22											
UMR L2C • Laboratoire Charles Coulomb (CNRS/UM) Directeur : Pierre Lefebvre, Pierre.Lefebvre@umontpellier.fr www.coulomb.univ-montp2.fr	150											
UMR LEASP • Laboratoire d'Épidémiologie et d'Analyses en Santé Publique (Inserm/UT3) Directrice : Sandrine Andrieu, sandrine.andrieu@univ-tlse3.fr www.u1027.inserm.fr/activites-scientifiques-341411.kjsp?RH=1304948096435&RF=1303915886944	103											
UMR LIRMM • Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (CNRS/UM) Directeur : Philippe Pognet, Philippe.Pognet@lirmm.fr www.lirmm.fr	167											
UMR LISAH • Laboratoire d'Étude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème (Inra/IRD/Montpellier SupAgro) Directeur : Jérôme Molénat, jerome.molenat@inra.fr www.umr-lisah.fr	26											
UMR LISST • Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (UT2)/CNRS/EHESS/ENSFEA) Directeur : Olivier Pliez, olivier.pliez@univ-tlse2.fr http://lisst.univ-tlse2.fr/	103											
UMR MARBEC • MARine Biodiversity, Exploitation and Conservation (IRD/Ifremer/UM/CNRS) Directeur : Laurent Dagorn, marbec-dir@listes.ird.fr www.umr-marbec.fr/fr	121											
UMR MISTEA • Mathématiques, Informatique et Statistique pour l'Environnement et l'Agronomie (Inra/Montpellier SupAgro) Directeur : Pascal Neveu, pascal.neveu@inra.fr www6.montpellier.inra.fr/mistea	14											
UMR MIVEGEC • Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle (IRD/CNRS/UM) Directeur : Frédéric Simard, frederic.simard@ird.fr, mivegec@ird.fr http://mivegec.ird.fr/fr/	90											
UMR SYSTEM • Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens (Cirad/Inra/Montpellier SupAgro/CIHEAM-IAMM) Directeur : Christian Gary, christian.gary@inra.fr http://umr-system.cirad.fr	22											
UMR TETIS • Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale (AgroParisTech/Cirad/CNRS/Irstea) Directrice : Christiane Weber, christiane.weber@cnrs.fr http://tetis.teledetection.fr	48											
UMS CALMIP • Calculateur en Midi-Pyrénées (CNRS) Directeur : Jean-Luc Estivalèzes, jean-luc.estivalèzes@imft.fr www.calmip.univ-toulouse.fr	7											
UPR GREEN • Gestion des ressources renouvelables et environnement (Cirad) Directrice : Aurélie Botta, dir-green@cirad.fr http://ur-green.cirad.fr	21											
UPR LBE • Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (Inra) Directeur : Nicolas Bernet, nicolas.bernet@inra.fr www6.montpellier.inra.fr/narbonne	15											
UR MIAT • Mathématiques et Informatique Appliquées de Toulouse (Inra) Directeur : Sylvain Jasson, sylvain.jasson@inra.fr https://mia.toulouse.inra.fr/Accueil	25											

Structures fédératives	Nombre de scientifiques	Chapitre 1			Chapitre 2				Chapitre 3			
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
#DigitAg • Institut Convergences Agriculture Numérique (Irstea/Inra/Cirad/Inria/UM/Montpellier SupAgro/AgroParisTech/ACTA) Coordinateur : Pierre Père, contact@hdigitag.fr www.hdigitag.fr/fr	352											
EquipEx GEOSUD • GEOinformation for Sustainable Development (AgroParisTech/Cerema/CINES/Cirad/CNRS/IGN/IRD, Irstea/UM/Univ. des Antilles/Univ. de Guyane/Univ. de la Réunion/AFIGEO/Geomatys) Coordinateur : Pierre Maurel, pierre.maurel@irstea.fr http://ids.equipex-geosud.fr/	100											
LabEx Agro • Agronomie et développement durable (CIHEAM-IAMMI/Cirad/CNRS/Inra/IRD/Irstea/Montpellier SupAgro/UAPV/UM/UPVD/UR/AgroParisTech/Agropolis Fondation) Directeur : Pascal Kosuth, kosuth@agropolis.fr www.agropolis-fondation.fr	1500											
LabEx CeMEB • Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité (UM/Cirad/CNRS/Ifremer/Inra/Inrap/IRD/EPHE/Montpellier SupAgro/UPVM/Unimes/UPVD) Directeur : Philippe Jarne, philippe.jarne@cefe.cnrs.fr www.labex-cemeb.org/fr	650											
LabEx Numev • Solutions Numériques, Matérielles et Modélisation pour l'Environnement et le Vivant (UM/CNRS/Inria/Inra/Montpellier SupAgro) Directeurs : Andréa Parmeggiani et Lionel Torres, numev-direction@umontpellier.fr www.lirmm.fr/numev	250											
LabEx SMS • Structurations des Mondes Sociaux (UT Capitole/UT2J/UT3/INPI/EP/CNRS/Inra/EHESS/ENSFEA) Directeur : Michel Grossetti, Michel.Grossetti@univ-tlse2.fr http://sms.univ-tlse2.fr	450											
LabEx TULIP • Towards a Unified theory of biotic interactions : roLe of environmental Perturbations (CNRS/Inra/UT3/INP-ENSAT/UPVD) Directeurs : Dominique Roby / Étienne Danchin, dominique.robey@inra.fr www.labex-tulip.fr	250											
XSYS • Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse (CNRS/Université de Toulouse) Coordinateur : Bertrand Jouve, contact@xsys.fr http://xsys.fr	200											

Les formations dans le domaine des « systèmes complexes » en Occitanie

Les établissements universitaires, écoles supérieures professionnelles et écoles d'ingénieurs d'Occitanie proposent un large éventail de formations diplômantes (de bac +2 à bac +8 : technicien, ingénieur, licence, master, mastère spécialisé, doctorat, etc.) dont le recensement exhaustif est en cours sur l'ensemble de la région. De nombreuses formations, diplômantes ou non, dispensées en région Occitanie incluent des modules qui ont trait à la

complexité. Nous indiquons ci-après quelques exemples de telles formations.

Agropolis International, au travers des établissements membres, universités et écoles d'ingénieurs (et institutions spécialisées dans la formation continue), propose une offre de formation complète sur Montpellier et le territoire du Languedoc-Roussillon — plus de 80 formations diplômantes et une centaine de modules de formation continue (préexistants

ou à la carte) — consultable en ligne (www.agropolis.fr/formation). Les formations dispensées par les universités, grandes écoles et organismes de recherche de Toulouse Midi-Pyrénées sont disponibles auprès des services de formation concernés dont on trouvera une liste sur le site de l'Université Fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées (www.univ-toulouse.fr/formation/formation-tout-au-long-de-la-vie/trouver-une-formation).

Quelques formations courtes non diplômantes

Établissement	Intitulé de la formation	Plus d'informations
AgroParisTech	Vers un système d'information décisionnel spatialisé à l'aide d'outils ETL (2 jours)	www.agroparistech.fr/Programmes-courts-de-formation-continue.html
	Initiation à la pratique de la concertation dans le domaine de l'eau (3 jours)	
	Modèle numérique de terrain : méthodes et outils (4 jours)	
	Usages de l'information spatiale dans les diagnostics de territoire (4 jours)	
Cirad	Conception de bases de données scientifiques à des fins d'analyses et de modélisation (5 jours)	www.cirad.fr/enseignement-formation/formation-professionnelle
	Simulation de dynamiques spatiales avec Ocelet (4 jours)	
	Modélisation d'accompagnement : mettre des acteurs en situation pour partager des représentations et simuler des dynamiques (5 jours)	
	Journées d'étude sur les systèmes complexes naturels et artificiels (1 semaine)	
CIHEAM-IAMM	Outils de modélisation et d'aide à la décision en agriculture et environnement : <i>Integrated assessment of agriculture and sustainable development</i> (cours intensif spécialisé en anglais)	www.iamm.ciheam.org/fr/education/fpc
	Modélisation et aide à la décision (module de master à la carte)	
Montpellier SupAgro	Data Science. Initiation à la data science ou science des données appliquée à l'agronomie, l'agroalimentaire (3 jours)	www.montpellier-supagro.fr/formations/formation-tout-au-long-de-la-vie/recherche-d-une-formation-continue
Université Toulouse III - Paul Sabatier	Simulation numérique et analyse de sensibilités : Modèles directs de sensibilités et résolutions parallèles pour les formulations différentielles et intégrales. Mise en œuvre pour des résolutions en différence finies ou volumes finis et pour des méthodes de type Monte Carlo. Introduction aux modèles de sensibilités adjoints (3 jours)	http://mfca.univ-tlse3.fr
	Ingénierie statistique de la complexité - Thermique : une formation aux techniques de simulation numérique et d'analyse de systèmes thermiques complexes par des approches statistiques (3 jours)	
	Ingénierie statistique de la complexité - La méthode de Monte Carlo : une introduction à la méthode de Monte Carlo avec un point de vue orienté vers les besoins de l'ingénieur confronté à la question de simuler et analyser numériquement un système complexe (3 jours)	
Écoles-chercheurs		
Association ComMod	École-chercheur « La Modélisation d'accompagnement : mettre des acteurs en situation pour partager des représentations et simuler des dynamiques » (1 semaine)	www.commod.org/formations/sessions-commod
Cirad, Irstea, Université de Rouen, Université Toulouse I Capitole, CNRS	MISS-ABMS - École d'été internationale & multiplateforme sur la modélisation & la simulation multi-agent appliquées à la gestion des ressources renouvelables (2 semaines)	www.agropolis.org/miss-abms Description p. 67
Inra	École-chercheur « Approches interdisciplinaires de la modélisation des agroécosystèmes : Système complexe, Modèle, Code »	www6.inra.fr/record cf. encadré page suivante

Niveau	Diplôme	Intitulé de la formation et spécialité	Établissement(s)	Plus d'informations
Bac + 5	Master	Biodiversité Écologie Évolution (B2E)- Parcours « Gestion Intégrée de l'Environnement, de la Biodiversité et des Territoires » (GeBioTE)	Université de Montpellier	www.masters-biologie-ecologie.com/blog/parcours-giebiote
	Master	M2 Neurosciences, Comportement, Cognition	Université Toulouse III - Paul Sabatier	www.masterbiosante.ups-tlse.fr/m2-neurosciences-comportement-cognition-610626.kjsp?RH=1298890088210
	Master	Calcul Haute Performance, Simulation	UPVD	www.univ-perp.fr/master-calcul-haute-performance-simulation-28140.kjsp?RH=1398759380070
	Ingénieur	Spécialisation I3D « Ingénierie Des Développements Durables » (transversale aux 6 écoles de l'INP Toulouse)	INP Toulouse	www.ensat.fr/fr/formations/formation-ingenieur/specialisations/ingenierie-des-developpements-durables.html
Bac + 6	Mastère spécialisé®	Systèmes d'informations localisées pour l'aménagement des territoires (SILAT)	AgroParisTech	www.agroparistech.fr/-/MS-SILAT-Systemes-d-informations-localisees-pour-l-amenagement-des-territoires-
		Eco-Ingénierie	INP Toulouse	www.inp-toulouse.fr/MSEI
Bac + 8	Doctorat	Programme doctoral international « modélisation des systèmes complexes » (PDI MSC)	IRD/UPMC/UMMISCO	www.pdimsc.upmc.fr/fr/le_programme_doctoral_international.html

La plateforme RECORD et l'école-chercheur sur la modélisation et simulation des agroécosystèmes

Face aux enjeux actuels de l'agriculture et de la société en matière environnementale, en lien notamment avec le changement climatique, l'étude des agroécosystèmes nécessite de plus en plus un travail pluridisciplinaire. Le recours à l'analyse systémique, la modélisation et l'expérimentation virtuelle informatique est une démarche qui permet d'analyser et d'évaluer un grand nombre de possibilités dans une grande diversité de situations. L'Inra a initié le développement de plateformes de modélisation et de simulation pour aider les scientifiques dans ce travail compréhensif et prospectif, notamment la plateforme RECORD spécifiquement développée pour l'étude des agroécosystèmes. Cependant ces plateformes semblent encore méconnues bien qu'elles constituent un formidable outil de partage et de travail pluridisciplinaire. Pour pallier ce problème, l'école-chercheur « Approches interdisciplinaires de la modélisation des agroécosystèmes : Système complexe, Modèle, Code » a été élaborée par un comité scientifique pluridisciplinaire. Les enjeux de cette école-chercheur sont de permettre aux chercheurs de développer leurs compétences sur l'analyse systémique et la modélisation de systèmes complexes et d'élargir la communauté RECORD actuelle pour

avancer sur les questions d'analyse, d'évaluation et de conception d'agroécosystèmes. Ses objectifs sont d'appréhender la démarche



systémique pour une construction interdisciplinaire de modèles, de mettre en œuvre la modélisation systémique sur un exemple fil rouge (un modèle de gestion territoriale de l'eau avec des enjeux agricoles, sociétaux et environnementaux), de développer des bonnes pratiques de modélisation (code, évaluation...), de connaître les principales plateformes de modélisation et les situer les unes par rapport aux autres, et, enfin, de découvrir et s'initier à la plateforme RECORD. Une première école-chercheur a eu lieu en mars 2017 (4 jours) avec une vingtaine d'intervenants de différentes disciplines. La création d'un MOOC est en cours sur la base des interventions faites à cette école-chercheur. Par ailleurs, des formations à l'utilisation de la plateforme ont lieu annuellement.

Contact : H. Raynal, Helene.Raynal@inra.fr
Plus d'informations : www6.inra.fr/record

L'Institut pour les transitions écologique, économique et énergétique (IT3E)

L'IT3E, organisme de formation continue en développement durable, a comme objectif de répondre au besoin urgent d'élargir les compétences indispensables pour conduire les mutations associées aux transitions de société, des sciences dures à la sociologie en passant par l'économie et le droit. Pour cela, l'institut bénéficie de la diversité des nombreuses structures de recherche et de formation au sein de l'université Toulouse III – Paul Sabatier, de l'Université Fédérale de Toulouse et, plus largement, d'Occitanie. Cette grande richesse permet de mobiliser dans chaque thématique, les spécialistes et les acteurs « experts » au plan territorial comme national et de traiter les multiples dimensions associées aux trois transitions. Pour enrichir l'offre de formation proposée par l'IT3E, XSYS propose des modules et participe à la mise en place d'enseignements sur les systèmes complexes et leurs applications dans le contexte des problématiques relevant des transitions.

Contact : V. Le Dantec, valerie.le_dantec@it3e.org
Plus d'informations : <http://xsys.fr/formation-continue-it3e-adaptation-aux-changements-climatiques>

Les formations dispensées par l'IT3E sont innovantes par leurs outils pédagogiques : *mentoring*, *e-learning* (MOOC, webinaires), classes inversées, partages d'expérience, forum ouvert, *mind mapping*, *serious game*, *hackathons*, mises en situation ou études de cas, etc. Les nombreux cursus proposés s'adressent à des professionnels de tous horizons — chefs d'entreprise, cadres supérieurs, élus locaux, responsables scientifiques et politiques, etc. La formation est faite sur mesure : les volumes horaires des cours sont ajustables ; les cycles peuvent se faire à distance ; les enseignements peuvent être choisis sur catalogue, à la carte ou à la demande ; la formation s'adapte à chaque niveau (sensibilisation, approfondissement, expertise).



Liste des acronymes & abréviations

AFIGEO	Association française pour l'information géographique
ANR	Agence Nationale de la Recherche
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CIHEAM-IAMM	Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes - Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier
CINES	Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNES	Centre national d'études spatiales
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
EA	Équipe d'accueil
EHESS	École des hautes études en sciences sociales
ENSFEA	École Nationale Supérieure de Formation de l'Enseignement Agricole de Toulouse
EPHE	École Pratique des Hautes Études
EquipEx	Équipement d'excellence
IEP	Sciences Po Toulouse
Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
IMT	Institut Mines-Télécom
INP Toulouse	Institut national polytechnique de Toulouse
INP-ENIT	École nationale d'ingénieurs de Tarbes
INP-ENSAT	École nationale supérieure agronomique de Toulouse
Inra	Institut national de la recherche agronomique
Inrap	Institut national de recherches archéologiques préventives
Inria	Institut national de recherche en informatique et en automatique
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
IRD	Institut de recherche pour le développement
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
LabEx	Laboratoire d'excellence
MESRI	Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales
OREME	Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers
PIA	Programme « Investissements d'Avenir »
RNSC	Réseau national des systèmes complexes
UAPV	Université d'Avignon et des pays de Vaucluse
UCA	Université Clermont Auvergne
UCAD	Université Cheikh Anta Diop, Sénégal
UM	Université de Montpellier
UMI	Unité mixte internationale
UMR	Unité mixte de recherche
UMS	Unité mixte de service
UMT	Unité mixte technologique
Unîmes	Université de Nîmes
UPMC	Université Pierre et Marie Curie / Sorbonne Université
UPR	Unité propre de recherche
UPVD	Université de Perpignan <i>Via Domitia</i>
UPVM	Université Paul-Valéry Montpellier 3
UR	Unité de recherche
USTH	<i>University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam</i>
UT Capitole	Université Toulouse 1 Capitole
UT2J	Université Toulouse - Jean Jaurès
UT3	Université Toulouse III - Paul Sabatier
WASCAL	<i>West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land Use</i>
XSYS	Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse

Les organismes membres et partenaires d'Agropolis International impliqués dans ce dossier

- | | |
|----------------|--|
| ACTA | IRD |
| AFIGEO | Irstea |
| AgroParisTech | Météo France |
| Airbus | Montpellier SupAgro |
| Cerema | ONERA |
| CIHEAM-IAMM | Safran |
| CINES | Sciences Po Toulouse |
| Cirad | Total |
| CNES | UAPV |
| CNRS | UCA |
| EDF | UCAD |
| EHESS | UM |
| ENSFEA | Unîmes |
| EPHE | Université de Guyane |
| Geomatys | Université de La Réunion |
| Ifremer | Université de Yaoundé 1 |
| IGN | Université des Antilles |
| IMT Mines Alès | Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées |
| INP-ENIT | UPMC Sorbonne Université |
| INP-ENSAT | UPVD |
| INP Toulouse | UPVM |
| Inra | USTH |
| Inrap | UT Capitole |
| Inria | UT2J |
| Inserm | UT3 |

Directeur de la publication : Jean-Luc Khalfaoui (Président, Agropolis International)

Coordination scientifique : Nicolas Arnaud (CNRS), Bertrand Jouve (CNRS), Jean-Pierre Müller (Cirad)

Coordination des chapitres : Nicolas Arnaud (CNRS), Olivier Barreteau (Irstea), Bertrand Jouve (CNRS), Thérèse Libourel (UM), Pierre Maurel (Irstea), Claude Monteil (INP-ENSAT), Jean-Pierre Müller (Cirad)

Coordination éditoriale : Isabelle Amsallem (Agropolis International), Aurélie Crette (XSYS), Bernard Hubert (Agropolis International)

Mise en page et infographie : Frédéric Pruneau

Communication : Nathalie Villeméjeanne (Agropolis International)

Ont participé à ce numéro : G. Abrami, A. Affouard, C. Albergel, F. Amblard, M. Andreollo, S. Andres, A. Apolloni, N. Arnaud, S. Aubert, Y. Aumeeruddy-Thomas, J.-C. Bader, C. Barnaud, O. Barreteau, D. Bazile, A. Béchet, M. Belém, J.-E. Bergez, N. Bernet, L. Berti-Equille, A. Biarnès, A. Binot, P. Bonnet, B. Bonté, F. Bouchette, F. Boudon, F. Boulier, Y. Boursiac, E. Bousquet, J.-C. Calvet, F. Campillo, B. Cappelaere, A. Caron, H. Chahdi, V. Chapurlat, R. Choquet, L. Ciandrini, E. Climent, D. Cornelis, C. Coste, P. Couteron, A. Crette, W. Daré, F. Daumas, M. de Garine-Wichatitsky, P. Degenne, L. de Kniff, C. Delenne, C. Delpierre, J. Demarty, P. de Reffye, J.-C. Desconnets, G. Despiaux, M. Despinoy, N. Dessay, A. Drogoul, R. Duboz, V. Ducrocq, C. Dumat, Y. Dumont, J.-L. Estivalèzes, J.-C. Fabre, M. Fargette, D. Felbacq, N. Ferrand, J. Fize, J.-M. Fromentin, T. Fourcaud, D. Galliano, C. Gaucherel, B. Gaudou, C. Gary, L. Gavotte, M. Gibert, S. Glémin, C. Godin, H. Goëau, A. Gojon, F. Goutard, M. Grossetti, Y. Guédon, L. Guerrini, J. Harmand, V. Herbreteau, D. Hervé, L. Housso, B. Hubert, B. Ildefonse, M. Jaeger, B. Jaillard, P. Jarne, A. Joly, H. Joly, B. Jouve, D. Kaplan, S. Kéfi, M. Kelly-Irving, P. Kosuth, V. Labeyrie, F. Laloë, R. Lancelot, A. Laurent, V. Le Dantec, J. Le Fur, P. Lemoisson, V. Leonardi, C. Le Page, A. Lesne, C. Lett, T. Libourel, Q. Liu, M. Loireau, J.-C. Lombardo, D. Lo Seen, S. Luque, C. Madera, N. Maestriperi, S. Manel, M. Mangeas, S. Mangiarotti, M. Mannna, G. Martin, M. Massol, P. Maurel, D. McKey, R. Métral, A. Miralles, F. Molino, N. Monnier, C. Monteil, J. Montmain, P. Montoro, I. Mougenot, D. Mouillot, C. Moulia, F. Munoz, J.-P. Müller, M. Paegelow, A. Parmeggiani, P. Pérès, C. Peugeot, M. Peyre, E. Pitard, O. Pliez, J.-C. Pouget, R. Pradel, O. Radulescu, A. Rapaport, H. Raynal, H. Rey-Valette, E. Rial-Sebbag, E. Rivals, D. Roby, B. Roche, M. Roche, O. Rouchon, A. Rousseau, E. Roux, H. Roux, R. Sabaddin, M. Saenz, J.-M. Salles, N. Salliou, M. Saqalli, T. Sari, F. Sedes, E. Servat, D. Sheeren, F. Simard, P. Taillandier, A. Tchangani, M. Teisseire, O. Therond, L. Torres, A. Tran, J. Villerd, C. Violle, M. Voltz, J. Wery

Remerciements pour l'iconographie : tous les contributeurs au dossier.

Impression : LPJ Hippocampe (Montpellier)
ISSN : 1628-4240 • **Dépôt légal :** juin 2018

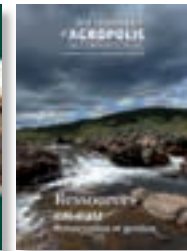
Également disponible en anglais



Juillet 2010
68 pages (2^{ème} éd., 2012)
Français et anglais



Octobre 2010
84 pages
Français et anglais



Février 2012
72 pages
Français, anglais, espagnol



Octobre 2012
48 pages
Français et anglais



Février 2013
48 pages
Français, anglais, espagnol



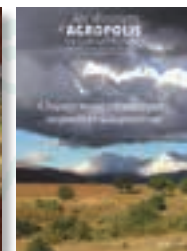
Octobre 2013
76 pages
Français



Décembre 2013
72 pages
Français, anglais



Février 2014
64 pages
Français, anglais, espagnol



Février 2015
88 pages
Français et anglais



Novembre 2015
76 pages
Français et anglais



Avril 2016
72 pages
Français

Les dossiers d'Agropolis International

La collection des *dossiers d'Agropolis International* est un outil phare de présentation et de promotion des compétences des membres d'Agropolis International sur des problématiques scientifiques majeures. Chaque dossier est consacré à une thématique spécifique. Les unités de recherche et les formations concernées y sont présentées ainsi que les travaux menés et leurs résultats. Les dossiers donnent aussi un éclairage sur les apports de la société civile, de la sphère économique et des collectivités territoriales dans ces domaines. Chaque dossier est décliné en version papier et numérique, généralement en deux langues (français et anglais).

Pour découvrir tous les numéros :
www.agropolis.fr/publications/dossiers-thematiques-agropolis.php

Les informations contenues dans ce dossier sont valides au 01/05/2018.



The background of the entire page is a network of thin grey lines connecting various colored circular nodes. The nodes are in shades of teal, orange, brown, and red. The right side of the page is a solid red vertical band. The logo 'AGROPOLIS INTERNATIONAL' is located in the bottom right corner of this red band. The word 'AGROPOLIS' is in white, with a green sphere and a red arc above the 'O'. 'INTERNATIONAL' is in white below it.

AGROPOLIS INTERNATIONAL

1000 avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél. : +33 (0)4 67 04 75 75
Fax : +33 (0)4 67 04 75 99
agropolis@agropolis.fr
www.agropolis.fr