les dossiers
d'AGROPOLIS
INTERNATIONAL
Compétences de la communauté scientifique en région Languedoc-Roussillon

Changement climatique : *impacts et adaptations*

Numéro 20

AGROPOLIS INTERNATIONAL

agriculture • alimentation • biodiversité • environnement

Agropolis International associe les institutions de recherche et d'enseignement supérieur de Montpellier et du Languedoc-Roussillon, les collectivités territoriales, des sociétés et entreprises régionales, en liaison avec des institutions internationales.

Agropolis International constitue un espace international ouvert à tous les acteurs du développement économique et social dans les domaines liés à l'agriculture, à l'alimentation, à la biodiversité, à l'environnement et aux sociétés rurales.

Agropolis International est un campus dédié aux sciences « vertes ». Il représente un potentiel de compétences scientifiques et techniques exceptionnel : 2 700 cadres scientifiques répartis dans 75 unités de recherche à Montpellier et en Languedoc-Roussillon, dont 400 scientifiques travaillant dans 60 pays.

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

- 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 ;
- Écotechnologies ;
- Interaction hôte-parasites et maladies infectieuses ;
- Modélisation, information géographique, biostatistiques ;
- Production et santé animales ;
- Ressources génétiques et biologie intégrative des plantes ;
- Une filière emblématique : vigne et vin.

Lieu de capitalisation et de valorisation des savoirs, espace de formation et de transfert technologique, plateforme d'accueil et d'échanges internationaux, la communauté scientifique Agropolis International développe des actions d'expertise collective et contribue à fournir des éléments scientifiques et techniques qui permettent d'élaborer et de mettre en place des politiques de développement.

Compétences de recherche du Languedoc-Roussillon dans l'étude des impacts et des adaptations au changement climatique

Ce dossier présente les acteurs de la recherche basés dans la région Languedoc-Roussillon, qui se mobilisent pour répondre aux enjeux liés à l'étude des impacts et des adaptations au changement climatique :

- 46 unités de recherche (UR, dépendant d'une seule tutelle), ou unités mixtes de recherche (UMR, dépendant de plusieurs tutelles), membres de la communauté scientifique d'Agropolis International ;
- 2 « laboratoires d'excellence » (LabEx Agro - Agronomie et développement durable, et LabEx CeMEB - Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité) et une structure fédérative (IM2E : Institut Montpelliérain de l'Eau et de l'Environnement) qui animent et coordonnent les activités scientifiques d'une partie de ces unités de recherche sur ces thèmes ;
- 5 infrastructures de recherche, d'envergure nationale ou européenne, dédiées à l'observation en milieu naturel ou à l'expérimentation en milieu contrôlé : l'Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement (OSU OREME), l'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer (OOB), une des trois antennes nationales du Centre national des ressources biologiques marines (EMBRC-France), le Centre d'écologie marine expérimentale MEDIMEER et l'Écotron européen de Montpellier ;
- 5 partenaires étrangers ou internationaux qui ont une implantation en région et mènent des activités scientifiques en lien avec les membres d'Agropolis : le Consortium du CGIAR (organisation internationale), les laboratoires extérieurs sans murs de l'Embrapa (Brésil) et de l'INTA (Argentine), et des implantations de laboratoires du CSIRO (Australie) et de l'USDA/ARS (États-Unis).

L'étendue des travaux scientifiques menés par les acteurs régionaux sur l'impact ou l'adaptation au changement climatique est très vaste. Loin d'être exhaustif, ce dossier a pour ambition d'offrir au lecteur un panorama de ces travaux, en présentant les acteurs impliqués et quelques exemples concrets de leurs activités de recherche. Ceux-ci sont présentés selon quatre grands champs thématiques :

- Changement climatique & ressources, territoires et développement
- Changement climatique & écosystèmes et biodiversité
- Changement climatique & interactions entre organismes
- Changement climatique & systèmes de production agricole et d'élevage

Les membres d'Agropolis International offrent également un large choix de formations diplômantes (de bac+2 à bac+8) au sein desquelles la problématique du changement climatique est prise en compte, en lien avec les recherches les plus récentes sur le sujet. La liste des formations dispensées est consultable en ligne (**www.agropolis.fr/formation**).

Changement climatique : *impacts et adaptations*

Avant-propos 4

Thématiques couvertes par les structures de recherche 5

Changement climatique & ressources, territoires et développement 8

Changement climatique & biodiversité et écosystèmes 26

Biodiversité et écosystèmes continentaux 28

Biodiversité et écosystèmes marins 40

Changement climatique & interactions entre organismes 52

Changement climatique & systèmes de production agricole et d'élevage 68

Liste des acronymes et des abréviations 86

Photo de couverture : ***Paysage de savane, Ambalavao, Hautes Terres (Madagascar)*** – M. Grouzis © IRD

Les informations contenues dans ce dossier sont valides au 01/02/2015 (révisé le 04/03/2015).

Avant-propos

L'année 2015 est marquée par une succession d'événements liés au changement climatique. Il en est notamment question au Salon International de l'Agriculture à Paris (février), à l'occasion de la 3e conférence scientifique *« Climate Smart Agriculture »* à Montpellier (mars) ainsi qu'à l'UNESCO* avec la conférence *« Our Common Future under Climate Change »* (juillet), moment scientifique de préparation de la 21e conférence des parties de la CCNUCC** qui se réunit à Paris en décembre. Le changement climatique constitue également l'une des préoccupations de la 3e conférence scientifique de la CNULD***, début mars à Cancún (Mexique). Nous avons ainsi pensé que les laboratoires des organismes de recherche présents en région Languedoc-Roussillon, reconnus par le niveau de leurs publications comme la première communauté scientifique française dans les domaines de l'agronomie, de l'environnement et de la biodiversité, se devaient de contribuer aux réflexions et aux débats qui émaillent cette année, par une publication présentant leurs équipes et travaux. Voici donc le 20e numéro des *Dossiers d'Agropolis International*, consacré aux impacts et aux adaptations aux changements climatiques !

Les unités de recherche constituant la communauté scientifique d'Agropolis, représentant des établissements français et étrangers, sont en mesure d'afficher une large pluridisciplinarité, qui autorise des approches intégrées particulièrement pertinentes au regard de l'agriculture et de la question des ressources naturelles. Elles participent à de nombreux réseaux nationaux et internationaux, associations et sociétés savantes qui leur offrent un contexte scientifique de premier plan pour développer ces approches. La communauté scientifique régionale dispose ainsi des compétences et outils nécessaires pour apporter une contribution à l'évaluation des conséquences du changement climatique et aux besoins d'adaptation qu'elles génèrent.

Le 5e rapport du GIEC**** s'inscrit dans la ligne des précédents. Il confirme leurs conclusions et vient renforcer des hypothèses de moins en moins contestables : le réchauffement du système climatique apparait désormais sans équivoque et nombre des changements observés sont sans précédent. De tels changements sont lourds de conséquences directes et indirectes, d'enjeux cruciaux pour les sociétés humaines et ils ne laissent pas d'interroger ou d'inquiéter quant à la préservation et à l'évolution de nos ressources. En effet, parallèlement à ces profondes modifications, les sociétés sollicitent toujours plus des écosystèmes souvent déjà dégradés et fragilisés. Les trajectoires de développement ont ainsi placé des populations ou des secteurs d'activité dans des situations de fortes vulnérabilités au regard du changement climatique et de ses conséquences sur les activités agricoles, les écosystèmes et les ressources naturelles.

Ce ne sont donc pas tant les processus mêmes du changement climatique qui sont étudiés ici, mais leurs effets et conséquences sur l'environnement et les systèmes de production, afin d'anticiper les changements à venir et de concevoir des modes d'intervention ou des transformations à réaliser, afin d'éviter les situations non désirées : on parle ainsi beaucoup de gestion adaptative.

On pourrait alors penser que nous nous situons essentiellement dans une perspective d'adaptation, comme si on avait renoncé à toute approche d'atténuation. Mais justement, une posture scientifique ne distinguera pas les deux volets d'un même combat, à la différence des débats plus politiques qui confrontent ces deux points de vue au nom de revendications stratégiques qui n'ont plus rien à voir avec la réalité du phénomène. Quand, par exemple, on travaille sur les systèmes d'élevage, ne s'intéresse-t-on pas à la fois à l'atténuation et à l'adaptation ?

Le dossier est organisé en quatre grandes parties qui abordent les questions soulevées d'un point de vue systémique. La première s'intéresse à la préservation et à l'utilisation des ressources aux échelles de leur gestion territoriale : fonctionnement des systèmes aquatiques et des bassins hydrologiques, usages de l'eau, rôle et place des espaces forestiers, dispositifs d'observation et d'information, formes sociales et modalités de gouvernance des territoires et des ressources... La deuxième privilégie l'entrée par les écosystèmes et la diversité biologique, garante de leurs fonctionnalités. Elle traite ainsi, d'une part, des écosystèmes continentaux, à partir d'indicateurs actuels ou passés afin de rendre compte de leurs dynamiques et, d'autre part, du milieu marin, côtier comme pélagique, depuis les populations de poissons jusqu'aux éléments du phytoplancton. La partie suivante aborde la question des interactions au sein du triptyque « organismes hôtes – organismes ravageurs, parasites/pathogènes ou symbiotiques – environnement » : elle aborde tant les méthodes de suivi et de contrôle fondées sur la modélisation de ces interactions que la conception de nouvelles pratiques visant à réduire les risques induits par les nouvelles dynamiques liées au changement climatique. Enfin, la dernière partie est consacrée aux systèmes de production agricole et d'élevage, depuis les recherches en génétique jusqu'à celles qui abordent les dimensions paysagères, de façon à situer les systèmes de production dans un environnement plus large, débouchant ainsi sur une meilleure compréhension des processus en cours et sur des propositions pour l'action.

L'ensemble confirme l'intérêt de développer des démarches intégrées, depuis les dimensions de la biologie fonctionnelle jusqu'aux approches à des échelles territoriales, en s'appuyant largement à la fois sur les observations, l'expérimentation et la modélisation, de façon à nous donner une meilleure intelligibilité des processus en cours et à agir avec discernement pour les limiter et s'y adapter.

Bonne lecture de cet annuaire de compétences, dans lequel chacun peut aller chercher références et adresses utiles en fonction de ses propres attentes. En espérant avoir démontré ainsi l'importante mobilisation de notre communauté scientifique pour faire face aux enjeux des changements climatiques en cours.

Bernard Hubert,
président d'Agropolis International

* Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
** Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique
*** Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification
**** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Thématiques couvertes *par les structures de recherche*

(Janvier 2015)

Les différentes structures de recherche apparaissant dans le texte de ce dossier sont consignées dans le tableau ci-dessous.

1. Changement climatique & ressources, territoires et développement
2. Changement climatique & biodiversité et écosystèmes
3. Changement climatique & interactions entre organismes
4. Changement climatique & systèmes de production agricole et d'élevage

La colonne « page » indique l'emplacement où figure le texte de présentation de la structure. Le point rouge (•) indique la thématique dans laquelle la structure développe principalement ses activités, les points noirs (•) les thématiques dans lesquelles elle est également impliquée.

Structures de recherche	Page	1	2	3	4
IM2E – Institut Montpelliérain de l'Eau et de l'Environnement *(BRGM/Cirad/CNRS/Inra/IRD/Irstea/AgroParisTech/Ciheam-IAMM/EMA/ENSCM/Montpellier SupAgro/UAG/UM/UPVM/UPVD/UR)* Directeur : Éric Servat, contact@im2e.org	10	•	•	•	•
UMR HSM – HydroSciences Montpellier *(IRD/UM/CNRS)* Directeur : Patrick Seyler, patrick.seyler@ird.fr	12	•			
UMR G-EAU – Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages *(AgroParisTech/Cirad/IRD/Irstea/Montpellier SupAgro)* Directeur : Olivier Barreteau, olivier.barreteau@irstea.fr	13	•			•
UMR EMMAH – Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes *(Inra/UAPV)* Directrice : Liliana Di Pietro, liliana.dipietro@avignon.inra.fr	14	•			•
UMR GM – Géosciences Montpellier *(CNRS/UM)* Directeur : Jean-Louis Bodinier, dirgm@gm.univ.montp2.fr	15	•			
UR D3E/NRE – Nouvelles Ressources en Eau et Économie *(BRGM)* Directeur : Jean-Christophe Maréchal, jc.marechal@brgm.fr	16	•			
UR LGEI – Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel *(EMA)* Directeur : Yannick Vimont, yannick.vimont@mines-ales.fr	17	•	•		
UR Green – Gestion des ressources naturelles et environnement *(Cirad)* Directrice : Martine Antona, dir-green@cirad.fr	19	•	•		•
UMR ESPACE-DEV – L'espace au service du développement *(IRD/UM/UR/UAG)* Directrice : Frédérique Seyler, frederique.seyler@ird.fr	20	•	•		•
UMR TETIS – Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale *(Cirad/AgroParisTech/Irstea)* Directeur : Jean Philippe Tonneau, jean-philippe.tonneau@cirad.fr	21	•	•		•
UMR GRED – Gouvernance, Risque, Environnement, Développement *(IRD/UPVM)* Directeur : Bernard Moizo, bernard.moizo@ird.fr	22	•	•		
UMR ART-Dev – Acteurs, Ressources et Territoires dans le Développement *(CNRS/UPVM/Cirad/UPVD/UM)* Directeur : David Gibband, artdev@univ-montp3.fr	24	•	•		•
UMR LAMETA – Laboratoire Montpelliérain d'Économie Théorique et Appliquée *(Inra/Montpellier SupAgro/UM/CNRS)* Directeur : Jean-Michel Salles, jean-michel.salles@supagro.inra.fr	25	•	•		•
LabEx CeMEB – Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité *(UM/UPVM/Montpellier SupAgro/CNRS/IRD/Inra/Cirad/EPHE/Inrap/UNîmes)* Directeur : Pierre Boursot, Pierre.Boursot@univ-montp2.fr	29	•	•	•	

Structures de recherche	Page	1	2	3	4
UMR CEFE –- Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive *(CNRS/UM/UPVM/EPHE/Montpellier SupAgro/IRD/Inra)* Directeur : Richard Joffre, dirCEFE@cefe.cnrs.fr	30	•	•	•	•
UMR ISEM – Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier *(CNRS/UM/IRD/EPHE)* Directrice : Agnès Mignot, dirisem@univ-montp2.fr	31		•	•	•
UMR AMAP – botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations *(Cirad/CNRS/Inra/IRD/UM)* Directeur : Thierry Fourcaud, diramap@cirad.fr	32	•	•		•
UR URFM – Écologie des Forêts Méditerranéennes *(Inra)* Directeur : Éric Rigolot, eric.rigolot@avignon.inra.fr	34	•	•	•	
UR B&SEF – Biens et Services des Écosystèmes Forestiers tropicaux *(Cirad)* Directeur: Laurent Gazull, laurent.gazull@cirad.fr	35	•	•		•
OSU OREME – Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement *(UM/CNRS/IRD)* Directeur : Éric Servat, oreme@univ-montp2.fr	36	•	•		
Écotron européen de Montpellier *(CNRS)* Directeur : Jacques Roy, jacques.roy@ecotron.cnrs.fr	37		•		
OOB – Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer *(UPMC/CNRS)* Directeur : Philippe Lebaron, lebaron@obs-banyuls.fr	41		•		
UMR CEFREM – Centre de Formation et de Recherche sur les Environnement Méditerranéens *(UPVD/CNRS)* Directeur : Wolfgang Ludwig, cefrem@univ-perp.fr	42	•	•		
UMR MARBEC – *Marine Biodiversity, Exploitation and Conservation* *(IRD/Ifremer/UM/CNRS)* Directeur : Laurent Dagorn, laurent.dagorn@ird.fr	44	•	•		
UMR LECOB – Laboratoire d'Écogéochimie des Environnements Benthiques *(UPMC/CNRS)* Directrice : Nadine Le Bris, lebris@obs-banyuls.fr	45		•		
UMR BIOM – Biologie Intégrative des Organismes Marins *(UPMC/CNRS)* Directeur : Hervé Moreau, umr7232@obs-banyuls.fr	46		•		
UMR LOMIC – Laboratoire d'Océanographie Microbienne *(UPMC/CNRS)* Directeur : Fabien Joux, dirumr7621@obs-banyuls.fr	47		•		
USR LBBM – Laboratoire de Biodiversité et Biotechnologies Microbiennes *(UPMC/CNRS)* Directeur : Marcelino Suzuki, suzuki@obs-banyuls.fr	48		•		
UMS MEDIMEER – Centre d'écologie marine expérimentale de l'OSU OREME *(CNRS-UM-IRD)* Directeur : Éric Servat, Eric.Servat@msem.univ-montp2.fr	49		•		
Centre national de ressources biologiques marines EMBRC-France (*European Marine Biological Resource Centre*), site de Banuyls-sur-mer *(UPMC/CNRS)* Directeur : Philippe Lebaron, lebaron@obs-banyuls.fr	50		•		
UMR CBGP – Centre de Biologie pour la Gestion des Populations *(Inra/Cirad/IRD/Montpellier SupAgro)* Directrice : Flavie Vanlerberghe, dircbgp@supagro.inra.fr	54		•	•	
UMR LSTM – Laboratoire des Symbioses Tropicales & Méditerranéennes *(IRD/Cirad/Inra/UM/Montpellier SupAgro)* Directeur : Robin Duponnois, Robin.Duponnois@ird.fr	55		•	•	•
UMR IPME – Interactions Plantes-Microorganismes-Environnement *(IRD/Cirad/UM)* Directrice : Valérie Verdier, valerie.verdier@ird.fr	56			•	•
UMR DGIMI – Diversité, Génomes et Interactions Microorganismes-Insectes *(Inra/UM)* Directrice : Anne-Nathalie Volkoff, volkoff@supagro.inra.fr	57		•	•	
UR B-AMR – Bioagresseurs : Analyse et Maîtrise du Risque *(Cirad)* Directeur : Christian Cilas, christian.cilas@cirad.fr	58			•	•
UR Pathologie Végétale *(Inra)* Directeur : Marc Bardin, Marc.Bardin@avignon.inra.fr	59			•	•
UMR BGPI – Biologie et Génétique des Interactions Plante-Parasite *(Inra/Cirad/Montpellier SupAgro)* Directrice : Claire Neema, bgpi-dir@cirad.fr	60			•	•

Structures de recherche	Page	1	2	3	4
Laboratoire européen du CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) *(CSIRO)* Directeur : Andy Sheppard, Andy.Sheppard@csiro.au	61		•	•	•
EBCL – Laboratoire européen de lutte biologique de l'USDA/ARS (*United States Department of Agriculture / Agricultural Research Service*) *(USDA/ARS)* Directeur : Lincoln Smith, Link.Smith@ars.usda.gov	62		•	•	•
UMR IHPE – Interactions Hôtes-Pathogènes-Environnements *(UM/UPVD/Ifremer/CNRS)* Directeur : Guillaume Mitta, mitta@univ-perp.fr	63		•	•	
UMR MIVEGEC – Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle *(IRD/CNRS/UM)* Directeur : Frédéric Simard, frederic.simard@ird.fr	64		•	•	
UMR InterTryp – Interactions hôtes-vecteurs-parasites-environnement dans les maladies tropicales négligées dues aux trypanosomatidés *(Cirad/IRD)* Directeur : Philippe Solano, philippe.solano@ird.fr	65			•	•
UMR CMAEE – Contrôle des Maladies Animales Exotiques et Émergentes *(Inra/Cirad)* Directeur : Thierry Lefrançois, thierry.lefrancois@cirad.fr	66			•	•
UR AGIRs – Animal et Gestion Intégrée des Risques *(Cirad)* Directeur : François Roger, francois.roger@cirad.fr	67		•	•	•
LabEx Agro – Agronomie et développement durable *(Ciheam-IAMM/Cirad/CNRS/Inra/IRD/Irstea/Montpellier SupAgro/UAPV/UM/UPVD/UR)* Directeur: Pascal Kosuth, fondation@agropolis.fr	70			•	•
UMR LISAH – Laboratoire d'étude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème *(Inra/IRD/Montpellier SupAgro)* Directeur : Jérôme Molenat, umr-lisah-dir@supagro.inra.fr	71	•			•
UMR System – Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens *(Cirad/Inra/Montpellier SupAgro/Ciheam-IAMM)* Directeur : Christian Gary, dirsystem@supagro.inra.fr	72	•			•
UR HortSys – Fonctionnement agroécologique et performances des systèmes de culture horticoles *(Cirad)* Directeur : Éric Malezieux, eric.malezieux@cirad.fr	73			•	•
UR Aïda – Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles *(Cirad)* Directeur : Éric Scopel, diraida@cirad.fr	74			•	•
UMR Selmet – Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux *(Cirad/Inra/Montpellier SupAgro)* Directeur : Alexandre Ickowicz, alexandre.ickowicz@cirad.fr	75				•
UMR Innovation – Innovation et développement dans l'agriculture et l'agroalimentaire *(Inra/Cirad/Montpellier SupAgro)* Directeur : Guy Faure, guy.faure@cirad.fr	76	•			•
UMR Eco&Sols – Écologie fonctionnelle & biogéochimie des Sols & des agro-écosystèmes *(Inra/Cirad/IRD/Montpellier SupAgro)* Directeur : Jean-Luc Chotte, eco-sols@ird.fr	77		•		•
UMR Agap – Amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales *(Cirad/Inra/Montpellier SupAgro)* Directeur : Patrice This, diragap@cirad.fr	78		•		•
UMR DIADE – Diversité, adaptation et développement des plantes *(IRD/UM)* Directeur : Alain Ghesquiere, alain.ghesquiere@ird.fr	79		•		•
UMR LEPSE – Laboratoire d'Écophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux *(Inra/Montpellier SupAgro)* Directeur : Bertrand Muller, bertrand.muller@supagro.inra.fr	80				•
UMR B&PMP – Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes *(Inra/CNRS/Montpellier SupAgro/UM)* Directeur : Alain Gojon, alain.gojon@supagro.inra.fr	81				•
Consortium du CGIAR Directeur : Frank Rijsberman, consortium@cgiar.org	83	•	•	•	•
LABEX Europe de l'Embrapa – Laboratoire extérieur sans murs de l'Embrapa (*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*) *(Embrapa)* Coordinateur : Claudio Carvalho, embrapa.labex.europe@agropolis.fr	84	•	•	•	•
LABINTEX – LABoratoire EXtérieur sans murs de l'INTA (*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*) *(INTA)* Coordinateur: Daniel Rearte, drearte@agropolis.fr	85	•	•	•	•

▲ *Bofedal : un écosystème-clé dans les hautes Andes tropicales (Bolivie).*

F. Anthelme © IRD-UMR AMAP

Changement climatique *& ressources, territoires et développement*

Comme l'indique le dernier rapport du GIEC, dans de nombreuses régions du monde, la modification du régime des précipitations et la fonte des neiges et des glaces perturbent les systèmes hydrologiques et influent sur la qualité et la quantité des ressources hydriques, ainsi que sur la dynamique et les ressources rassemblées dans la « zone critique » à la vie en général. Au cours du XXIe siècle, un appauvrissement sensible des ressources renouvelables en eau de surface et en eau souterraine est anticipé dans la plupart des régions subtropicales arides. Par ailleurs, les changements climatiques actuels laissent craindre des perturbations importantes des relations entre les sociétés et leur environnement, à même de menacer les services écosystémiques dont elles bénéficient directement ou indirectement. Les incidences d'évènements climatiques extrêmes survenus récemment — vagues de chaleur, sécheresses, inondations, cyclones, etc. — soulignent la grande vulnérabilité et le degré élevé d'exposition des écosystèmes et des sociétés humaines à la variabilité actuelle du climat.

Dans ce contexte, la recherche se doit d'apporter des éclairages à de grands enjeux tels que (1) l'étude de l'impact du changement climatique sur les socioécosystèmes à diverses échelles territoriales et la caractérisation de leur vulnérabilité ; (2) la définition, avec les divers acteurs concernés, des mesures d'adaptation à mettre en œuvre pour atténuer les effets du changement climatique ; et (3) le développement d'outils d'évaluation et de suivi pour accompagner la prise de décision et la gestion adaptative des ressources.

La communauté scientifique réunie au sein d'Agropolis est particulièrement bien armée pour apporter, avec ses nombreux partenaires nationaux et internationaux, des éléments de réponse ou de réflexion à ces grandes questions, qui se posent de manière différenciée au sein de différents socioécosystèmes sur tous les continents et à différentes échelles territoriales.

Les recherches sur les ressources en eau sont fédérées au sein de l'Institut Montpelliérain de l'Eau et de l'Environnement, qui embrasse les disciplines de la géologie, l'hydrologie, la chimie/biogéochimie, la microbiologie, l'agronomie, les sciences de l'ingénieur, les sciences économiques et sociales, la modélisation... S'appuyant sur des moyens techniques importants, portés pour certains d'entre eux par l'OSU OREME (observatoires permanents, plateformes de recherche communes, grands plateaux techniques, etc.), les questionnements scientifiques des unités de recherche membres de l'Institut portent notamment sur :

❶ **L'analyse de la ressource, des flux et des transferts d'eau, et leur évolution en lien avec le changement climatique :** fonctionnement des aquifères complexes (notamment les aquifères karstiques typiques de la région méditerranéenne, par exemple à travers le projet LEZ-GMU) ; scénarios d'évolution des régimes hydrologiques en lien avec les changements globaux *via* la modélisation et les approches prospectives (projets REMedHE ou *ClimAware*) ; impact du changement climatique sur la qualité de la ressource.

❷ **L'analyse de la vulnérabilité des territoires aux effets du changement climatique :** évolution du trait de côte et risques de submersion, impacts sur les écosystèmes aquatiques d'eau douce, risques sociétaux liés aux évènements extrêmes (inondations, rareté de l'eau), développement d'indicateurs pertinents pour le suivi et l'évaluation.

❸ **Les enjeux de l'adaptation :** de nombreux travaux portent aussi sur l'efficience de l'utilisation de l'eau en agriculture, à l'échelle du paysage (par exemple à travers le projet ALMIRA), de la parcelle (notamment avec les pratiques agro-écologiques), et jusqu'à celle des plantes (projets *HydroRoot* et *LeafRolling*) ; d'autres travaux concernent l'agriculture pluviale ou irriguée (étude de l'impact de l'irrigation sur les ressources hydriques, mise au point et diffusion d'innovations pour réduire la consommation d'eau, mobilisation de nouvelles ressources telles que la réutilisation des eaux usées). Un autre pan de la recherche sur l'adaptation s'intéresse aux modalités de gestion de la ressource, aux niveaux politique, économique, institutionnel, par des approches multi-acteurs et la mise au point d'outils d'aide à la décision.

Au-delà des seules ressources en eau, la communauté scientifique régionale aborde la question plus globale des dynamiques des interactions nature-société à travers la gestion des ressources naturelles (sol, ressources minérales, biodiversité) et la gouvernance des territoires et des milieux. Dans ce domaine, les recherches menées visent la compréhension des relations entre les sociétés et les services écosystémiques fournis par leur environnement, de leur évolution en lien avec les changements globaux, de leur vulnérabilité ou conflictualité et de leurs capacités d'adaptation et de résilience. Les stratégies d'adaptation sont analysées en prenant en compte les articulations entre dynamiques globales et locales, entre enjeux et acteurs : individus, institutions locales, régionales, nationales, internationales (projets AFCAO, « De terres et d'eaux », SERENA, EcoAdapt).

Enfin, l'une des forces de la communauté scientifique régionale concerne également la spatialisation et l'historisation des connaissances en environnement pour le suivi environnemental et l'aide à la décision, en s'appuyant sur des méthodologies variées : la télédétection et l'observation spatiale, l'observation directe du milieu, les enquêtes auprès des acteurs, le traitement des données, la mise au point d'indicateurs, la modélisation des connaissances et des données numériques.

Éric Servat (IM2E)
& Nicolas Arnaud (OSU OREME)

Changement climatique *& ressources, territoires et développement*

Une structure fédérative qui fait du Languedoc-Roussillon un moteur national de la recherche sur l'eau

L'ensemble des moyens mis en œuvre par *« l'Institut Montpelliérain de l'Eau et de l'Environnement »* **(IM2E – BRGM, Cirad, CNRS, Inra, IRD, Irstea, AgroParisTech, Ciheam-IAMM, EMA, ENSCM, Montpellier SupAgro, UAG, UM, UPVM, UPVD, UR)** fait du Languedoc-Roussillon (L-R) la région où la recherche publique dans le domaine de l'eau est la plus importante et la plus diversifiée du territoire national, hors Île-de-France.

Les structures principales

IM2E
Institut Montpelliérain de l'Eau et de l'Environnement
(BRGM/Cirad/CNRS/Inra/IRD/Irstea/AgroParisTech/Ciheam-IAMM/EMA/ENSCM/Montpellier SupAgro/UAG/UM/UPVM/UPVD/UR)
400 scientifiques

UMR ART-Dev
Acteurs, Ressources et Territoires dans le Développement
(CNRS/UPVM/Cirad/UPVD/UM)
66 scientifiques

UMR EMMAH
Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes
(Inra/UAPV)
53 scientifiques

UMR ESPACE-DEV
L'espace au service du développement
(IRD/UM/UR/UAG)
35 scientifiques

UMR G-EAU
Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages
(AgroParisTech/Cirad/IRD/Irstea/Montpellier SupAgro)
60 scientifiques

UMR GM
Géosciences Montpellier
(CNRS/UM)
90 scientifiques

Suite p. 14

La gestion des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques constitue l'un des défis majeurs de l'humanité pour le 21e siècle. La prise en considération des enjeux correspondants (environnementaux, alimentaires, sanitaires, sociétaux, économiques et financiers, politiques et géopolitiques...) nécessite des approches pluridisciplinaires. Dans cette optique, l'IM2E fédère un ensemble de moyens techniques et humains pour :

- relever les défis de connaissance et d'adaptation afin de faire face aux enjeux sur l'eau ;
- promouvoir l'interdisciplinarité pour répondre aux problématiques environnementales ;
- acquérir, depuis son positionnement en L-R, une visibilité scientifique internationale ;
- produire des innovations technologiques et des savoir-faire en interaction avec le pôle de compétitivité à vocation mondiale « Eau », ainsi qu'avec le *cluster* Swelia (regroupant plus de 100 entreprises du L-R spécialisées dans le secteur de l'eau) ;
- appuyer les politiques publiques par une expertise multidisciplinaire reconnue ;
- devenir un Centre de ressources européen de premier plan (en formation et recherche), attractif à la fois pour les pays du Nord et du Sud.

Le projet porté par l'IM2E se base sur différents domaines d'excellence partagés par la communauté scientifique et sur lesquels s'appuient des challenges primordiaux en termes d'exploitation durable des écosystèmes et d'adaptation aux changements climatiques.

L'objectif est également d'accroître la production d'innovations et les capacités de recherche en entreprise, ainsi que de formuler des recommandations pour les institutions en charge de la conception, de la mise en œuvre et du suivi des politiques publiques (ministères, agences de l'eau, collectivités territoriales).

La force et la réussite de l'IM2E passent par la mutualisation des moyens partagés dans de nombreux domaines : formation, plateformes techniques et analytiques, moyens d'observation et de modélisation. Dans ce dernier secteur en particulier, l'ambition revendiquée de la structure fédérative est, pour l'avenir, de développer des modèles hybrides, complexes et riches en interactions.

La formation bénéficie quant à elle directement de l'émergence de l'IM2E, qui est soucieux de favoriser les relations avec les entreprises et les collectivités afin d'améliorer l'employabilité des diplômes portés par ses établissements et unités partenaires. L'IM2E vise aussi à internationaliser les formations, notamment à travers l'accueil d'un minimum de 30 % d'étudiants étrangers et de plus de 200 étudiants de niveau Master et supérieur. •••

▲ *Paysage cultivé en Tunisie.*
© R. Calvez

ALMIRA : adapter les mosaïques paysagères pour mieux gérer la production, les sols et l'eau agricoles

Afin d'atténuer les pressions induites par les changements climatiques et socioéconomiques, le projet « Adaptation des mosaïques paysagères dans les agrosystèmes pluviaux méditerranéens pour une gestion durable de la production agricole, des ressources en eau et en sol » (ALMIRA) propose de raisonner l'organisation spatiale relative à l'occupation du sol et aux systèmes de culture afin d'optimiser la fourniture de plusieurs services écosystémiques (production de biomasse agricole, production d'eau de surface dans les retenues artificielles, minimisation de l'érosion...).

Dans le cadre de ce projet, ces organisations spatiales sont labellisées « mosaïques paysagères » et envisagées à la fois en tant que :

1. réseaux d'éléments naturels et anthropiques qui intègrent les relations entre processus biophysiques et socioéconomiques dans un bassin versant ressource ;
2. structures qui impactent les flux dans le paysage, de la parcelle agricole au bassin versant, avec des conséquences sur les fonctionnalités paysagères et les services résultants ;
3. levier d'action pour la gestion des espaces cultivés, *via* la mise en œuvre d'un principe de conciliation entre production agricole et conservation des ressources en sol et en eau.

Pour ce faire, ALMIRA propose de concevoir, de mettre en œuvre et de tester une nouvelle approche de modélisation intégrée. Cette dernière explicite, de la parcelle agricole à la petite région, les innovations et les leviers d'action des acteurs dans les scénarios prospectifs d'évolution des mosaïques paysagères, ainsi que les organisations spatiales et les processus biophysiques et socioéconomiques considérés.

Sur le plan méthodologique, la mise en œuvre de cette modélisation intégrée nécessite :

1. la conception de scénarios d'évolution de paysage spatialement explicites ;
2. le couplage des processus biophysiques impliqués dans l'hydrologie des bassins versants cultivés ;
3. la cartographie numérique des paysages ;
4. l'évaluation économique des fonctionnalités paysagères.

Cette approche de modélisation intégrée est testée sur trois bassins versants situés en France, au Maroc et en Tunisie. ALMIRA rassemble des chercheurs issus de ces trois pays et d'un large éventail de disciplines scientifiques. Au sein de ce partenariat, deux unités du laboratoire d'excellence « LabEx Agro » travaillent en particulier sur la caractérisation des systèmes de culture (UMR SYSTEM, *voir page 72*) et des processus biophysiques (UMR LISAH, *voir page 71*).

Contact : Frédéric Jacob, frederic.jacob@ird.fr
Pour plus d'informations : www.almira-project.org

Équilibre entre ressources en eau et usages : les besoins futurs seront-ils satisfaits ?

Le projet GICC REMedHE 2012-2015 (« Gestion et Impacts du Changement Climatique — Impacts du changement climatique sur la gestion intégrée des Ressources en Eau en Méditerranée : évaluation comparative Hérault-Ebre ») associe des scientifiques de HSM et du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, CEA, CNRS, UVSQ) et des gestionnaires de bassin (syndicat mixte du bassin du fleuve Hérault, confédération hydrographique de l'Ebre).

Il vise à évaluer les impacts potentiels d'évolutions climatiques et anthropiques à l'horizon 2050 sur les régimes hydrologiques et les demandes en eau au sein des bassins de l'Hérault (2 500 km², France) et de l'Ebre (85 000 km², Espagne) afin de proposer différentes stratégies de gestion de la ressource pour le maintien des équilibres entre disponibilité et demande en eau. Ces questions sont appréhendées à travers le développement d'une chaîne de modélisation intégratrice préalablement calée et validée sur une période rétrospective de quatre décennies. La modélisation comporte trois étapes :

- la simulation des ressources en eau (écoulements naturels et perturbation par les barrages et canaux) ;
- la représentation de la dynamique spatio-temporelle des usages (domestiques, agricoles, industriels et énergétiques) et des demandes en eau associées ;
- et l'évaluation des équilibres usages/ressources en eau, au travers d'indicateurs de vulnérabilité.

Des scénarios prospectifs complexes ont été formalisés à partir des dernières simulations climatiques du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) et de scénarios socioéconomiques locaux établis en concertation avec les gestionnaires. Les premiers résultats montrent que les bassins seraient soumis à des conditions climatiques plus déficitaires (augmentation des températures associée à une diminution des précipitations printanières et estivales) et à des pressions anthropiques croissantes (augmentation de la population et des surfaces irriguées).

La combinaison de ces conditions devrait entraîner une diminution sensible de la ressource en eau disponible, ainsi qu'une augmentation des besoins domestiques et d'irrigation, fragilisant ainsi les équilibres futurs entre ressources et demandes. Des stratégies d'adaptation visant à réduire la demande en eau (amélioration de l'efficience, changements de pratiques agricoles) ou à augmenter la disponibilité (gestion alternative des barrages, transferts d'eau inter-bassins) sont donc actuellement testées dans la chaîne de modélisation. L'objectif est d'explorer la viabilité de trajectoires qui s'inscrivent dans un avenir incertain.

Contact : Denis Ruelland, denis.ruelland@um2.fr

Pour plus d'informations : www.remedhe.org

Recherche et formation en sciences de l'eau

Le **laboratoire** ***« HydroSciences Montpellier »*** **(UMR HSM – IRD, UM, CNRS)** est une unité mixte de recherche qui s'investit pleinement dans les recherches en sciences de l'eau. Son périmètre de travail couvre un large éventail de domaines allant de la biogéochimie aux événements extrêmes, en passant par la microbiologie, l'étude des eaux souterraines et celle du cycle hydrologique. Il développe l'essentiel de son activité scientifique dans les régions méditerranéennes et tropicales.

HydroSciences est organisé autour de quatre axes scientifiques :
- Transferts, contaminants, pathogènes, environnement, santé
- Eau, changements environnementaux et sociétaux
- Transferts dans les éco-hydrosystèmes
- Karsts, milieux hétérogènes et évènements extrêmes

Deux ateliers transversaux à vocation méthodologique complètent l'organisation du laboratoire : « ATHYS » (atelier en hydrologie spatialisée) et « Traceurs dans l'hydrosphère » (atelier favorisant l'utilisation des techniques analytiques de traçage de transferts ou de processus hydrologiques).

HydroSciences Montpellier a une très forte implication dans le domaine de l'enseignement et de la formation par la recherche. Les formations portées par le laboratoire (Masters « Eau », « Ingénierie de la Santé », « Polytech'Montpellier-Sciences et Technologies de l'Eau ») attirent des étudiants issus de tout le territoire français, mais aussi de l'étranger et notamment des pays du Sud. L'UMR s'implique également du niveau Licence au Doctorat.

Le laboratoire est membre de l'Observatoire des sciences de l'univers OREME (Observatoire de recherche méditerranéen de l'environnement). Il appuie ses recherches sur des dispositifs techniques importants tels que le Grand plateau technique régional « Analyse des Éléments en Trace dans l'Environnement » (GPTR AETE) et le Laboratoire mutualisé d'analyse des isotopes stables de l'eau (LAMA).

L'un des points forts d'HydroSciences est son rayonnement, qui se mesure par son implication dans de nombreux projets nationaux et internationaux, par la reconnaissance de plusieurs de ses thématiques au meilleur niveau international, et par un important réseau de collaborations avec des laboratoires et institutions de recherche dans de nombreuses régions du monde, au Nord comme au Sud.

L'UMR HSM travaille également avec des partenaires publics tels que la Direction régionale de l'environnement, l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), des collectivités territoriales (communautés de communes ou d'agglomérations, syndicats mixtes de bassin), des bureaux d'études et de nombreuses entreprises privées (SDEI, Bio-U, SOMEZ, *etc.*). Soucieuse de s'impliquer dans le domaine de la valorisation, l'unité a déposé des brevets (en particulier dans le domaine de la métrologie) et elle a développé des logiciels à destination des professionnels (« progiciels », notamment autour des bases de données). L'un des domaines d'excellence d'HSM — les contaminants organiques — fait l'objet d'une chaire de formation et de recherche, en partenariat avec Veolia, intitulée « Analyse des risques liés aux contaminants émergents en milieu aquatique ». En outre, l'UMR est engagée dans le cadre des pôles de compétitivité « Eau » (à vocation mondiale) et « Gestion des risques et vulnérabilité des territoires ».

Gestion de l'eau et adaptation au changement climatique : des travaux pluridisciplinaires

L'**UMR *« Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages »* (G-EAU – AgroParisTech, Cirad, IRD, Irstea, Montpellier SupAgro)** mène des travaux interdisciplinaires sur la gestion de l'eau. Elle regroupe des compétences en sciences de l'univers (hydrologie, hydraulique), sciences de l'ingénieur (automatique, mécanique des fluides, mécanique des structures), sciences du vivant (agronomie) et sciences humaines et sociales (économie, sociologie, science politique). Elle comporte aussi des compétences méthodologiques pour la mise en œuvre de l'interdisciplinarité. Ses terrains d'étude se situent principalement en Europe et en Afrique, avec un focus sur le bassin méditerranéen.

Ces compétences sont mises en œuvre au sein de neuf équipes, elles-mêmes orientées vers les enjeux de gestion adaptative de l'eau et des milieux aquatiques et centrées sur des objets particuliers :

❶ Gestion hydraulique, optimisation et supervision des transferts d'eau
❷ Optimisation du pilotage et des technologies d'irrigation
❸ Controverses et actions publiques
❹ Innovation et changement en agriculture irriguée
❺ Outils et gouvernance de l'eau et de l'assainissement
❻ Dynamiques croisées « eaux et sociétés »
❼ Participation pour la gestion de l'eau
❽ Analyse expérimentale des dynamiques et des régulations socio-hydrologiques
❾ Évaluation : de la production des indicateurs à leur usage

Ces équipes abordent les questions d'adaptation au changement climatique sous plusieurs angles.

- L'unité a par exemple analysé les possibilités d'adaptation de la gestion des réservoirs du bassin de la Seine en amont de Paris.
- Elle travaille également sur l'impact de projets hydrauliques en Afrique subsaharienne, comme l'extension des périmètres irrigués sur le bassin du Niger supérieur.
- Le changement climatique est aussi vu sous l'angle de la vulnérabilité générée. L'unité travaille sur sa modélisation et la capacité d'adaptation des individus et des institutions. Plusieurs projets ont ainsi porté sur la gestion des inondations ou de la rareté de l'eau, en Europe (France, Espagne) et au Maghreb (Tunisie, Maroc).
- L'unité s'intéresse par ailleurs aux conséquences non intentionnelles des adaptations au changement dans les zones côtières.
- D'un point de vue méthodologique, l'unité travaille sur la mise en œuvre de démarches participatives pour une gestion intégrée des ressources naturelles en Afrique (projet Afromaison). Ces travaux mettent l'accent sur les incertitudes liées aux changements globaux et leur perception.
- Enfin, les innovations technologiques et organisationnelles constituent une voie d'adaptation. L'unité s'intéresse à cet égard à des technologies plus efficientes d'usage de l'eau (comme l'optimisation du pilotage de l'irrigation sous contraintes climatiques) et aux possibilités de mobilisation de nouvelles ressources comme les eaux usées (projet *Water4Crops* par exemple). •••

ClimAware : gestion de réservoirs et adaptation au changement climatique

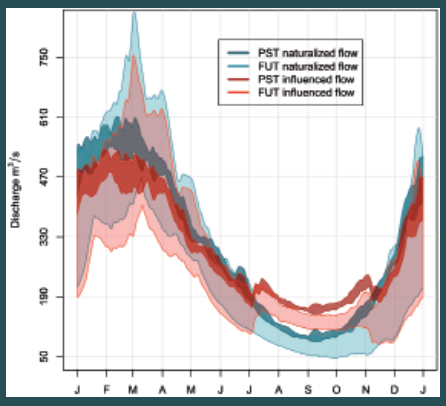
Le projet ClimAware (2010-2013), financé par IWRM-NET (*Integrated Water Resource Management* — « Vers un réseau européen d'échanges pour l'amélioration de la diffusion des résultats de recherche sur la gestion intégrée des ressources en eau »), a eu pour objectif de développer des stratégies d'adaptation visant à limiter les impacts du changement climatique, à partir de cas d'étude à l'échelle régionale et dans trois domaines liés à l'eau :

- hydro-morphologie sur le bassin versant de l'Eder en Allemagne (Université de Kassel, Allemagne),
- irrigation dans la région des Pouilles en Italie (Ciheam-IAM de Bari, Italie),
- et gestion de réservoirs sur le bassin de la Seine en France (UMR G-EAU).

Une modélisation intégrée à l'échelle européenne a été développée à des fins d'analyses croisées entre les deux échelles d'étude (Université de Kassel).

Le cas d'étude sur la Seine concentre des enjeux socioéconomiques majeurs en région parisienne. Il se focalise sur l'adaptation de la gestion des réservoirs avec deux objectifs principaux : le soutien d'étiage et la gestion des crues. Quatre grands réservoirs d'une capacité totale de 800 millions de mètres cubes gérés par l'Établissement Public Territorial de Bassin (EPTB) Seine Grands Lacs, partenaire du projet, contrôlent la partie amont de la Seine et de ses trois principaux affluents (Aube, Yonne et Marne).

© D. Dorchies



▲ ***Impact du changement climatique à Paris.***
Débits moyens journaliers pour sept scénarios climatiques, en temps présent (PST) entre 1961 et 1991, et en temps futur (FUT) entre 2046 et 2061. Débits naturalisés (en bleu) et influencés (en rouge) par les règles actuelles de gestion des lacs.

Une chaîne de modélisation hydrologique intégrant la gestion des réservoirs a été développée pour simuler le fonctionnement hydrologique du bassin. Ses paramètres ont été calés à partir des conditions actuelles (observations climatiques et de gestion sur la période 1958-2009). La chaîne de modélisation a ensuite été forcée par des données issues de sept modèles climatiques, en conditions présentes (1961-1991) et futures (2046-2065). Des scénarios d'adaptation des courbes annuelles de remplissage et de la gestion en temps réel des réservoirs ont été proposés et leurs performances ont été testées en conditions climatiques présentes et futures, puis comparées avec celles de la gestion actuelle.

Les résultats montrent que les changements climatiques pourraient avoir un impact significatif sur les débits d'étiage, quelle que soit la stratégie de gestion choisie pour les quatre lacs-réservoirs du bassin.

Contact : David Dorchies, david.dorchies@irstea.fr

Pour plus d'informations : www.uni-kassel.de/fb14/wasserbau/CLIMAWARE

Réutilisation des eaux usées en irrigation

▲ *Irrigation d'une oliveraie à Chypre.* © P. Renault

La réutilisation des eaux usées permet de faire face aux problèmes croissants de ressources en eau — quantité et/ou qualité — dus à la croissance démographique, à l'urbanisation, au réchauffement climatique et aux usages de l'eau environnementaux (alimentation de cours d'eau ou de lacs) ou récréatifs (piscines, parcs aquatiques, irrigation de terrains de sport…). Elle est importante en régions semi-arides ou arides (Sud-Ouest des États-Unis, Australie, Proche-Orient, Moyen-Orient, pays méditerranéens) et s'est développée ces dernières années en Espagne, en Italie, à Chypre et à Malte. Elle reste modérée en Grèce et est négligeable dans les autres pays d'Europe du Sud (Portugal, France, ex-République yougoslave, Albanie, Bulgarie).

Promouvoir cette pratique nécessite une meilleure évaluation des risques sociétaux, technologiques, sanitaires, agricoles et environnementaux, l'identification des contraintes actuelles, et le développement d'outils d'aide à la décision pour éclairer les arbitrages publics et ceux des monteurs de projets. L'UMR EMMAH a réalisé une synthèse rassemblant environ 600 articles sur le sujet. Elle a identifié certains facteurs de réussite et les contraintes du recyclage en association avec Suez-Environnement, TNO (organisation néerlandaise pour la recherche appliquée, Pays-Bas), l'Université polytechnique de Valence (Espagne) et l'UMR « Environnement et Grandes Cultures » (Inra, AgroParisTech). Avec, en Espagne, *Veolia Water Systems Iberica* et le groupe *Economía del Agua* de l'*Universitat de Valencia*, elle a soumis à la Climate-KIC (*Knowledge and Innovation Community* : un réseau dédié au changement climatique) un projet pour évaluer la viabilité économique et la compétitivité du recyclage agricole, identifier les opportunités de marché et définir des stratégies « gagnant-gagnant ».

Parallèlement, l'UMR mène des travaux sur le devenir environnemental (sol, eau, plante, atmosphère) des virus entériques présents dans les eaux usées. Des collaborations permettent d'y associer une évaluation quantitative des risques microbiens et, à l'avenir, une analyse économique. Plusieurs programmes de recherche sur ces thèmes sont en cours ou en instance de financement (par le CNRS-INSU, l'ANR, Agropolis Fondation, Campus France). Ils regroupent divers partenaires dont Suez-Environnement, le Centre National de Référence des virus entériques, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), le *Laboratory for Molecular Biology of Pathogens* (Technion, Israël), les unités de recherche G-EAU, Mathématique et Informatique Appliquées (AgroParisTech, Inra), D3E/NRE, *etc.*

Contact : Pierre Renault, pierre.renault@avignon.inra.fr

Pour plus d'informations : www6.inra.fr/agadapt/Water-reuse/State-of-the-art

Les structures principales

UMR GRED
Gouvernance, Risque, Environnement, Développement
(IRD/UPVM)
53 scientifiques

UMR HSM
HydroSciences Montpellier
(IRD/UM/CNRS)
90 scientifiques

UMR LAMETA
Laboratoire Montpelliérain d'Économie Théorique et Appliquée
(Inra/Montpellier SupAgro/UM/CNRS)
53 scientifiques

UMR TETIS
Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale
(Cirad/AgroParisTech/Irstea)
42 scientifiques

UR D3E/NRE
Nouvelles Ressources en Eau et Économie
(BRGM)
16 scientifiques

UR Green
Gestion des ressources renouvelables et environnement
(Cirad)
18 scientifiques

UR LGEI
Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel
(EMA)
30 scientifiques

Impacts des changements globaux sur l'eau et adaptation en milieu méditerranéen

L'**UMR *« Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes »* (EMMAH – Inra, UAPV)** rassemble du personnel de l'Inra d'Avignon, et de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

Ses recherches portent :
- d'une part, sur l'impact des changements globaux sur la ressource hydrique (en termes de quantité et de qualité), sur la production agricole et indirectement sur l'environnement et l'homme ;
- d'autre part, sur l'adaptation aux changements globaux.

Ses travaux s'appuient sur l'observation de sites instrumentés, sur des expérimentations en conditions contrôlées ou semi-contrôlées (en laboratoire notamment), et sur des développements méthodologiques pour mieux comprendre et modéliser le fonctionnement des écosystèmes méditerranéens.

L'UMR réunit diverses compétences lui permettant de travailler sur l'évolution des paysages à l'échelle régionale (notamment l'occupation des sols) et sur le transfert d'eau dans le *continuum* : aquifère, zone non saturée profonde, sol, plante et atmosphère. Elle étudie également la réactivité biogéochimique qui affecte la qualité de l'eau, le devenir environnemental des pathogènes de l'homme, et le fonctionnement des cultures en fonction du climat.

© S. Pistre

▲ *Surveillance du littoral.*

Changement climatique, géodynamique terrestre et manifestations de surface : analyse et maîtrise des risques

L'**UMR « *Géosciences Montpellier* » (GM – CNRS, UM)** développe une approche globale de la dynamique terrestre et de ses manifestations de surface, prenant en compte les couplages entre les différentes enveloppes (dont l'hydrosphère).

L'objectif est d'améliorer la compréhension des processus dynamiques aux différentes échelles, tout en tenant compte d'attentes sociétales telles que :

- l'approvisionnement en ressources non énergétiques (minérales et hydriques) ;
- les choix énergétiques pour l'avenir, qu'il s'agisse de prolonger les réserves carbonées ou de développer de nouvelles filières énergétiques (hydrogène naturel, géothermie…) ;
- le stockage et le confinement des déchets (aval du cycle nucléaire, CO_2, déchets miniers…) ;
- les risques naturels (tremblements de terre, tsunamis, risques gravitaires, inondations…) ;
- les changements environnementaux et climatiques à fort impact anthropique (évolution du trait de côte, intrusions salées littorales).

Cinq équipes de recherche (« Manteau & Interfaces », « Dynamique de la lithosphère », « Risques », « Bassins » et « Transferts en milieu poreux ») travaillent sur trois axes scientifiques majeurs : la géoynamique, les réservoirs et les risques. On relèvera en particulier le sous-thème « Risque et climat », qui regroupe les problématiques liées aux changements climatiques :

- prévision des pluies intenses ;
- paléoclimats, événements extrêmes et dynamique des systèmes littoraux ;
- modélisation hydromorpho-dynamique et aléa littoral.

Sur le pourtour méditerranéen, l'UMR GM est en charge de deux sites expérimentaux du « Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement » (SOERE H+) : le Larzac pour la France et Majorque pour l'Espagne. L'unité est également membre de l'OREME et, à ce titre, elle effectue différentes tâches d'observation. Elle est par ailleurs impliquée dans le GPTR AETE*, et elle héberge certains équipements des plateformes nationales du CNRS-INSU tels que le gravimètre absolu et le microscope électronique à balayage par diffraction « MEB-EBSD ».

GM est au cœur d'un vaste réseau de coopération nationale et internationale, à la fois européen (programme HORIZON2020) méditerranéen (Afrique du Nord, Moyen-Orient) et ouvert vers la plupart des continents (Taïwan, Japon, Inde, Australie, Nouvelle-Zélande, Iran, Brésil, Mexique, États-Unis).

GM collabore aussi avec le monde socioéconomique, notamment *via* la création d'entreprises par des doctorants et *via* le financement de contrats de recherche et de thèses. Citons notamment le *cluster* Géosciences lancé en 2011 et qui réunit les principaux acteurs en région L-R du secteur de l'entreprise (Geoter, Cenote, imaGeau, Schlumberger, Fugro, Antea, Areva, Lafarge) et de ceux de la recherche et de la formation (GM, BRGM, EMA, CEFREM, HSM). •••

* GPTR-AETE: Grand Plateau Technique Régional « Analyse des Éléments en Trace dans l'Environnement ».

▲ *Traçage artificiel pour la caractérisation des transferts et l'évaluation de la vulnérabilité de l'hydrosystème du Lez.*
© V. Leonardi

Mieux gérer les besoins croissants en eau en intégrant les enjeux hydrogéologiques et socioéconomiques

Les missions principales de l'**UR** ***« Nouvelles Ressources en Eau et Économie »*** **de la « Direction Eau, Environnement, Écotechnologies » (D3E/NRE – BRGM)** sont de :

- rechercher les modalités optimales de gestion des eaux souterraines (gestion active), notamment pour les aquifères complexes (karst, socle, volcanique), dans un contexte où elles sont soumises à des contraintes croissantes (changement climatique, pression anthropique, évolution socioéconomique, urbanisation, *etc.*) ;
- développer des approches économiques appropriées pour répondre aux nouveaux besoins de la gestion intégrée des ressources en eau, des milieux aquatiques et des risques.

Les activités de cette unité, tant dans le domaine de la recherche scientifique que pour les actions d'appui au service public, visent à :

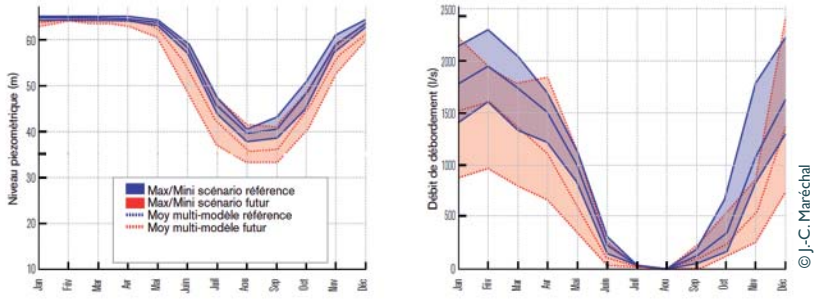
- développer des méthodes innovantes pour explorer et évaluer, du point de vue de leur structure et de leur fonctionnement, les potentialités des aquifères de type karst, socle, milieu volcanique, gisement thermo-minéral et d'eau minérale ;
- caractériser la distribution des propriétés hydrodynamiques des aquifères complexes — y compris les aquifères littoraux — afin d'élaborer des méthodes de gestion active des ressources en eau. Il s'agit de mettre en œuvre une approche pluridisciplinaire en géologie, hydrogéologie, géophysique, géochimie et économie ;
- développer des approches de prospective et des méthodes d'évaluation de la valeur économique des ressources environnementales, de modéliser les différentes demandes en eau, d'analyser des mécanismes économiques et institutionnels de régulation de l'accès à la ressource, ainsi que d'évaluer la vulnérabilité économique des usagers aux changements globaux ;
- enfin, de développer des outils de modélisation et d'aide à la décision à la fois pour la gestion de ces aquifères et pour la prévision, à différentes échelles, de l'impact des changements globaux (climatiques et anthropiques), ceci en intégrant les questions physiques et socioéconomiques.

C'est par la valorisation de potentiels encore peu exploités, voire inexploités, des ressources en eau naturelles (aquifères complexes) et des ressources en eau non conventionnelles (eaux usées traitées, eaux de surface, eaux pluviales…) que le pôle Recherche et Développement (R&D) de cette unité répond aux demandes sociétales inhérentes aux besoins croissants en eau. Ainsi, de manière générale, l'objet d'étude de l'UR D3E/NRE est « l'eau souterraine et les aquifères » du point de vue des hydrogéologues et des économistes.

Il faut cependant noter que, par le biais d'un programme scientifique sur l'économie des milieux et des risques, les économistes de l'unité ont également vocation à intégrer au cœur des projets de R&D ou d'appui aux politiques publiques, voire à l'international, des objets d'étude tels que les risques naturels ou les sites et les sols contaminés (anciennes friches industrielles par exemple).

La problématique de la gestion de l'eau reste à tout point de vue la pièce maîtresse, qu'on l'envisage sous l'angle de l'environnement ou sous celui de l'évaluation des risques naturels.

Projet LEZ-GMU : une étude de l'impact du changement global sur la ressource en eau souterraine, à partir de l'exemple de l'aquifère karstique du Lez



▲ *Impact du changement climatique sur la ressource en eau.*

Résultats comparés des simulations du modèle hydrogéologique de la source du Lez soumis aux neuf scénarios de climat : au présent (en bleu) et en 2050 (en rouge). Deux variables : le niveau piézométrique à la source (en « m NGF », i.e. en mètres par rapport au Nivellement Général de la France) et son débit de débordement (en « l/s », i.e. en litres par seconde).

Le projet de recherche « Gestion multi-usages des aquifères karstiques méditerranéens — Le Lez, son bassin versant et son bassin d'alimentation » (LEZ-GMU), coordonné par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), a regroupé un partenariat constitué par l'UR D3E/NRE, les UMR HSM, G-EAU, TETIS, le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) et le bureau d'étude en ingénierie écologique Biotope. Ce projet a été financé par Montpellier Agglomération, le Conseil Général de l'Hérault, l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse et le BRGM.

Son objectif était d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement de l'hydrosystème du Lez (Hérault, France) et la qualité de la ressource, dans un contexte de gestion active et de changement global. Dans le cadre de ce travail, des modèles hydrogéologiques reproduisant le fonctionnement de l'hydrosystème du Lez ont été construits. Ils ont permis d'étudier l'impact du changement global sur la ressource en eau souterraine. Neuf scénarios climatiques issus du projet SCRATCH 2010 du CERFACS (projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21e siècle) ont été utilisés. Ces scénarios indiquent une augmentation de la température et une légère diminution des précipitations à l'horizon 2050.

Le comportement du système karstique a été évalué pour différentes sollicitations de pompage avec ou sans changement climatique. Il ressort que l'impact du changement climatique se traduirait par une diminution de la recharge annuelle de l'ordre de 30 % en moyenne. Cette réduction s'observerait surtout sur les périodes automnales et printanières et, dans une moindre mesure, en hiver. Elle se manifesterait par une diminution de la piézométrie au sein de l'aquifère et se traduirait par une légère augmentation de la durée des assecs de la source du Lez (+30 jours en moyenne par rapport à la période de référence). Les scénarios de prélèvement montrent un risque d'augmentation des rabattements de la nappe, mais ils permettent aussi — aux incertitudes près inhérentes à ce type d'approche — d'envisager d'augmenter le volume prélevé actuellement, tout en maintenant un niveau piézométrique supérieur à 20 m NGF (altitude des pompes) en moyenne mensuelle.

Contact : Jean-Christophe Maréchal, jc.marechal@brgm.fr

Analyse et gestion des flux de polluants et des risques naturels et technologiques

Le *« Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel »* **(UR LGEI – EMA)** est l'un des trois laboratoires propres à l'École des Mines d'Alès, qui elle-même dépend du ministère de l'Industrie.

Le LGEI s'intéresse à la gestion des ressources, depuis les écosystèmes, les hydrosystèmes et les systèmes anthropiques, jusqu'aux matières premières que sont les ressources fossiles et minérales. L'exploitation de ces ressources doit se faire de façon raisonnée et responsable afin d'assurer, d'une part, la pérennité des écosystèmes et, d'autre part, la capacité de l'humanité à produire.

Pour répondre à ces challenges, le LGEI développe une approche pluridisciplinaire autour des thématiques suivantes :

- d'une part, le diagnostic de la qualité chimique et écologique des eaux et des effluents ; le développement des filières de traitement ; la gestion intégrée de flux polluants (milieux industriels, ressources en eau) selon une approche de type « écologie territoriale » ;
- d'autre part, la compréhension et la spatialisation des processus hydrologiques au niveau du bassin versant ; la compréhension et la modélisation des aquifères karstiques ou fracturés pour une gestion durable de la ressource en eau ;
- enfin, l'analyse et la gestion de risques naturels et technologiques.

Les activités de recherche menées au sein du LGEI se centrent principalement sur la gestion des ressources en eau en lien avec les forçages anthropiques et climatiques. Par ailleurs, la demande sociétale (gestionnaires de bassin, agence de l'eau) incite l'unité à s'intéresser à différents types de contaminations (polluants persistants, toxines, bloom algal) dans l'optique de mieux appréhender l'état (chimique et écologique) des masses d'eau ainsi que leur évolution potentielle.

L'ambition du LGEI est de développer des systèmes intégrateurs (capteurs, réseaux de capteurs, traitement de données, modélisation) et de proposer des outils d'aide à la décision pour différents acteurs (collectivités, entreprises en charge de l'assainissement ou de la potabilisation de l'eau).

Concernant l'étude des hydrosystèmes, les compétences du LGEI sont surtout axées sur la modélisation statistique à l'aide de réseaux de neurones formels qui permettent de réaliser des modèles opérants sur des systèmes non linéaires et non stationnaires. Ce choix implique un questionnement sur la validité des modèles — uniquement construits à partir des données — face aux évolutions futures que sont le changement climatique ou les événements extrêmes. Pour cela, les équipes du LGEI portent un soin particulier à la validation des modèles, en évaluant leurs performances sur l'évènement le plus intense de la base de données (crue, sécheresse), *voir un exemple de projet conduit par le LGEI page 38.* •••

Bilan hydrique des cultures et changement climatique

▼ *Résidus en place.*

F. Baudron © Cirad

Au travers de mesures en milieu réel couplées à de la modélisation, l'équipe « Évaluation des Systèmes de Culture Annuels » de l'UR Aïda (*voir page 74*) cherche à mieux caractériser l'effet des pratiques agricoles conventionnelles et innovantes sur les performances agronomiques et environnementales des cultures. Cette évaluation porte notamment sur l'impact des pratiques sur l'utilisation de l'eau. Ainsi, dans certaines situations, l'amélioration de l'infiltration et la réduction de l'évaporation grâce à un paillis superficiel de résidus permet d'augmenter les rendements en céréales sans accroitre leur variabilité interannuelle. En revanche, dans d'autres situations, généralement plus humides, l'augmentation de l'infiltration de l'eau, même si elle contribue à réduire les problèmes d'érosion, ne se traduit que par une augmentation du drainage sans effet notable sur le rendement des cultures.

Une meilleure représentation de ces phénomènes dans les modèles de cultures permet de mieux quantifier *ex ante* le potentiel des techniques innovantes qui cherchent à améliorer l'adaptation aux futurs changements climatiques. Ces travaux sont menés actuellement dans le cadre des projets *Agroecology-based aggradation-conservation agriculture* (ABACO) et « Changements environnementaux et sociaux en Afrique : passé, présent, futur » *(Environmental and Social Changes in Africa: Past, present and futurE, ESCAPE).* Le projet ABACO, financé par l'Union européenne, vise à évaluer et mettre en œuvre des solutions techniques inspirées de l'agriculture de conservation et de l'agro-écologie et destinées à réduire la dégradation des sols et l'insécurité alimentaire. Le projet ESCAPE, financé par l'ANR, vise à évaluer la vulnérabilité des sociétés rurales d'Afrique subsaharienne aux changements climatiques et environnementaux, ainsi qu'à explorer des voies d'adaptation pour réduire cette vulnérabilité.

L'UR Aïda contribue à ce travail notamment en appréciant l'impact des changements climatiques à venir sur les systèmes de culture. Ces projets sont développés dans des pays tels que le Burkina Faso, Madagascar ou le Sénégal, et les questionnements scientifiques auxquels les équipes d'Aïda apportent des réponses (*via* le test *in silico* de changements techniques et organisationnels) sont du type : « Peut-on envisager de réduire les risques économiques pour les exploitations à l'aide d'assurances sur les productions agricoles basées sur des analyses météorologiques ? »

Contact : François Affholder, francois.affholder@cirad.fr
Pour plus d'informations : www.locean-ipsl.upmc.fr/~ESCAPE

Comprendre les réponses des plantes au stress hydrique pour des performances accrues face au changement climatique

Du fait des changements globaux et dans le contexte d'une demande alimentaire mondiale croissante, il devient crucial de bien comprendre comment les plantes absorbent et utilisent l'eau du sol, et comment les céréales en particulier tolèrent le stress hydrique et y réagissent. Deux projets menés au sein de l'UMR B&PMP (*voir page 81*) explorent ces problématiques.

Le projet *HydroRoot* propose d'accroître notre connaissance fondamentale du transport racinaire d'eau. Il mènera à une vision intégrée de la racine, en prenant en considération les propriétés hydrauliques des tissus et l'architecture racinaire, ainsi qu'en expliquant comment ces composants sont contrôlés au niveau moléculaire par des facteurs physiologiques ou environnementaux. Du fait de ses fortes composantes physiologiques et génétiques, ce type de recherche pourra aussi influer sur des programmes de sélection variétale, afin de produire des plantes optimisées pour leur utilisation de l'eau et leurs réponses aux stress.

L'enroulement des feuilles, qui résulte de mouvements de cellules contractiles présentes dans l'épiderme foliaire, est quant à lui une réponse adaptative au déficit hydrique observée chez de nombreuses céréales. Le projet *LeafRolling* a pour objectif d'identifier les mécanismes moléculaires à l'origine des variations de turgescence et de contractilité de ces cellules en s'intéressant en particulier aux flux ioniques transmembranaires.

Des analyses moléculaires, physiologiques et agronomiques seront effectuées sur un panel de cultivars de blé présentant des degrés de tolérance à la sécheresse variables, ainsi que sur des lignées modifiées dans l'expression de gènes codant des systèmes de transport d'ions. Ces études permettront d'examiner le rôle de ces gènes dans l'enroulement des feuilles et la productivité du blé en conditions de déficit hydrique.

S. Mahboub © Université de Casablanca

Y. Boursiac © B&PMP

Ce projet est développé en collaboration avec le laboratoire Écologie et Environnement de la Faculté des Sciences Ben M'sik de Casablanca (Maroc), dans le cadre d'un Partenariat Hubert Curien du ministère des Affaires étrangères et du Développement international français.

Contacts : Christophe Maurel, christophe.maurel@supagro.inra.fr
Anne-Aliénor Very, anne-alienor.very@supagro.inra.fr
Pour plus d'informations : www1.montpellier.inra.fr/ibip/bpmp

▲ *Enroulement de feuilles de blé dur en situation de sécheresse. L'enroulement diminue la surface foliaire exposée au rayonnement, ce qui réduit l'échauffement des tissus et la perte d'eau par transpiration.*

▶ *Représentation des voies de passage de l'eau dans une racine de plante, lors de son transfert radial, du sol vers les tissus vasculaires.*

Projet EcoAdapt : adaptation au changement climatique pour le développement local

▲ *Mesure de paramètres climatiques dans la forêt modèle de Jujuy, en Argentine.*

Le projet EcoAdapt est financé par l'Union européenne pour une durée de quatre ans, à compter de janvier 2012, dans le cadre de son 7e Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD). Il vise à promouvoir une coopération intégrée entre science et société civile, au bénéfice des écosystèmes et des populations de trois pays d'Amérique latine. EcoAdapt espère démontrer que le travail conjoint des scientifiques et des organisations de la société civile (OSC) peut aider à concevoir des stratégies d'adaptation au changement climatique reposant sur des bases sociales et techniques solides. Les OSC apportent leurs connaissances issues de leur travail sur le terrain avec les populations locales, tandis que les chercheurs apportent leurs connaissances acquises par l'expérimentation dans le champ des sciences sociales et biophysiques.

Ce travail, qui consiste à articuler entre elles différentes formes de connaissances afin d'aboutir à la production de connaissances collectives nouvelles, constitue le véritable défi relevé par EcoAdapt pour soutenir les populations vivant dans les zones d'action du projet : les forêts modèles de Jujuy en Argentine, de Chiquitano en Bolivie et de Alto Malleco au Chili.

EcoAdapt se fonde sur l'idée que l'adaptation au changement climatique ne peut se faire que dans un effort collectif, chacune des organisations complémentaires œuvrant en fonction de ses compétences et de ses champs d'action. Le consortium du projet compte cinq OSC et quatre partenaires scientifiques, dont l'UR Green et l'UMR ART-Dev. Les acteurs locaux participant au projet sont parties prenantes des plateformes de forêts modèles (universités, agences nationales, associations de producteurs, conseils communautaires, opérateurs privés, *etc.*). Au niveau international, le projet a également des connexions avec le réseau latino-américain des bureaux en charge du changement climatique (RIOCC*) et avec le réseau ibéro-américain des forêts modèles (IAMFN**).

L'expérience du projet EcoAdapt dans la création de plans d'adaptation sera mise à profit pour d'autres zones où les conflits liés à l'utilisation des ressources en eau pourraient être exacerbés par les effets croissants du changement climatique. À cette fin, EcoAdapt s'appuie sur les réseaux existants tout en les renforçant et en les développant, ce qui permet non seulement une diffusion efficace des résultats du projet, mais aussi son enrichissement constant par de nouvelles idées.

Contact : Grégoire Leclerc, gregoire.leclerc@cirad.fr

Pour plus d'informations : www.ecoadapt.eu

* *Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático.*
** *Ibero-American Model Forest Network.*

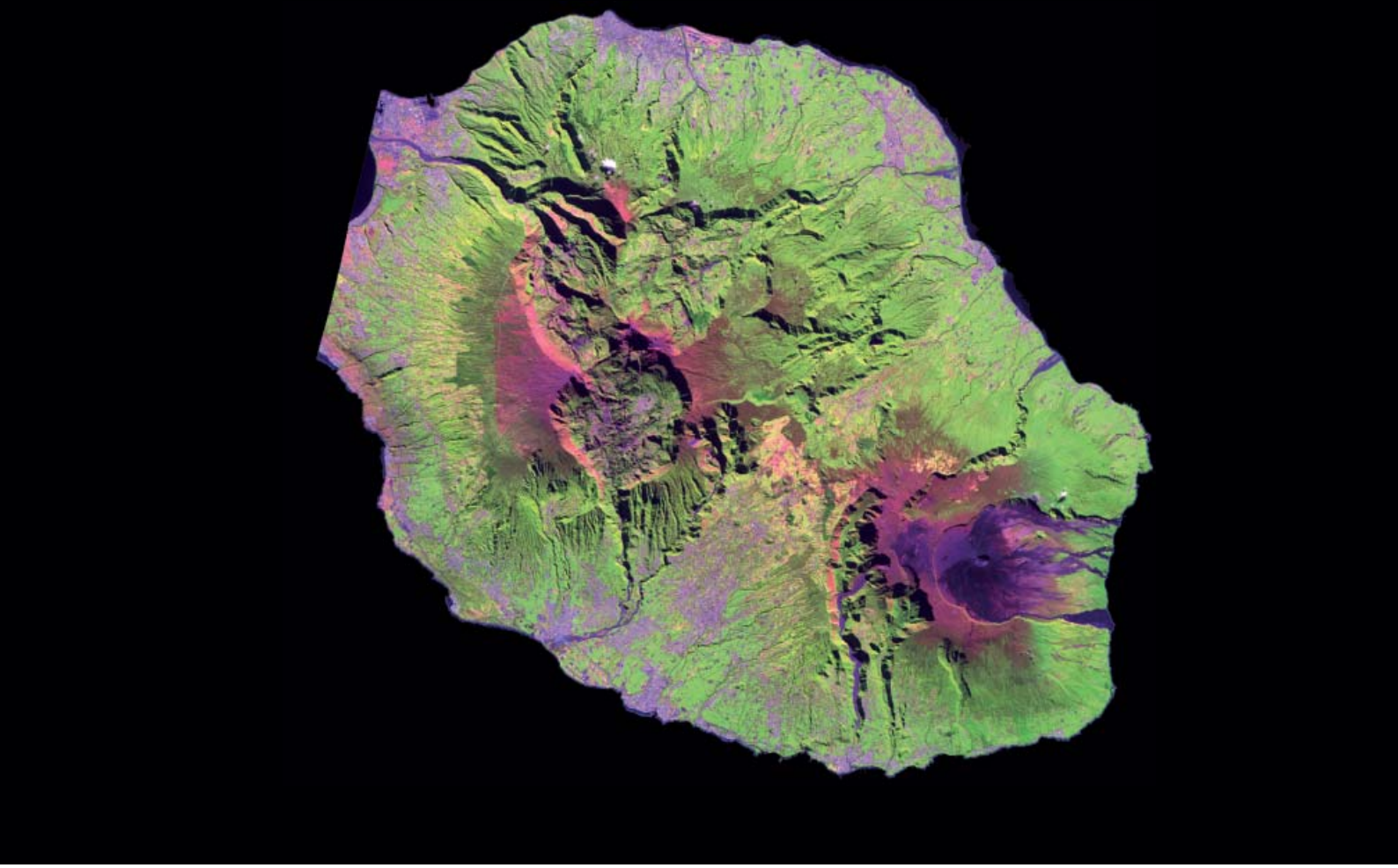
Adaptation et transformation de socioécosystèmes

L'**UR** ***« Gestion des ressources renouvelables naturelles et environnement »*** **(Green – Cirad)** aborde depuis 1994, de façon systémique et interdisciplinaire, le rôle des écosystèmes et de l'environnement comme facteur de la viabilité du développement. L'unité fournit des connaissances, des méthodes et des outils pour la compréhension des systèmes écologiques et sociaux (ou socioécosystèmes, « SES »). Elle s'intéresse à différentes ressources (eau, forêt, foncier, pêcheries…), qu'elle étudie à diverses échelles : du village à la région et parfois jusqu'au pays, depuis des zones définies par les dynamiques sociales (zones de fronts pionniers) jusqu'à des écosystèmes (bassin versant, écosystèmes forestiers, *etc.*). Elle développe de façon transversale des réflexions sur la biodiversité, le foncier, les changements d'utilisation des terres, l'arbitrage entre conservation et exploitation, ainsi que l'accès et les modes d'appropriation des ressources naturelles renouvelables.

En association avec de nombreuses communautés scientifiques du Nord et du Sud, l'unité intervient sur tous les continents. Bien qu'établie à Montpellier, elle s'investit plus particulièrement en Afrique de l'Ouest, dans l'océan Indien, en Asie du Sud-Est et plus récemment en Amérique centrale et au Brésil.

L'un des axes de recherche de l'UR traite de l'adaptation et de la transformation : il s'agit de savoir comment une société dans son environnement — un SES — appréhende des perturbations données. Autrement dit, il s'agit d'étudier, au travers d'un ensemble de concepts et d'outils, comment cette société s'y prépare et y réagit.

Les travaux de Green consistent notamment en l'analyse des facteurs et mécanismes qui font évoluer ces interactions nature-société au sein des SES : évolution des points de vue et/ou des savoirs et/ou des pratiques, jeux de pouvoir, mobilisation de réseaux, processus socioéconomiques ou environnementaux. •••



▲ *Image SPOT 4 du 19/05/2009, île de La Réunion : image en fausses couleurs (MIR/ PIR/ R), programme Kalideos du CNES.*

© 2009 CNES ; BD KALIDEOS ISLE-REUNION ; Distribution SPOT Image

Spatialisation des connaissances en environnement : pour le suivi des zones tropicales vulnérables au changement global

Créée en 2011, l'**UMR *« L'espace au service du développement »* (ESPACE-DEV – IRD, UM, UR, UAG)** mène des recherches (fondamentales, technologiques et appliquées) sur les processus décisionnels en faveur du développement durable dans les territoires du Sud, aux échelles locales, régionales et globales. En mettant le focus sur la surveillance de l'environnement et la gestion des ressources renouvelables, l'UMR examine les questions de spatialisation des connaissances en environnement. L'objectif est d'aider à la décision dans les régions tropicales périphériques vulnérables aux changements globaux.

Les compétences de l'UMR ESPACE-DEV sont multiples et vont de la recherche à la formation, en passant par l'expertise et le service.

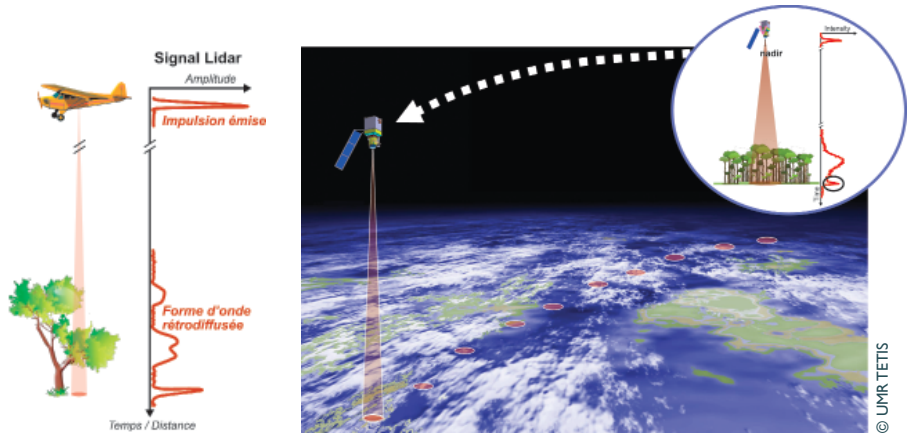
Trois équipes de recherche structurent l'unité.

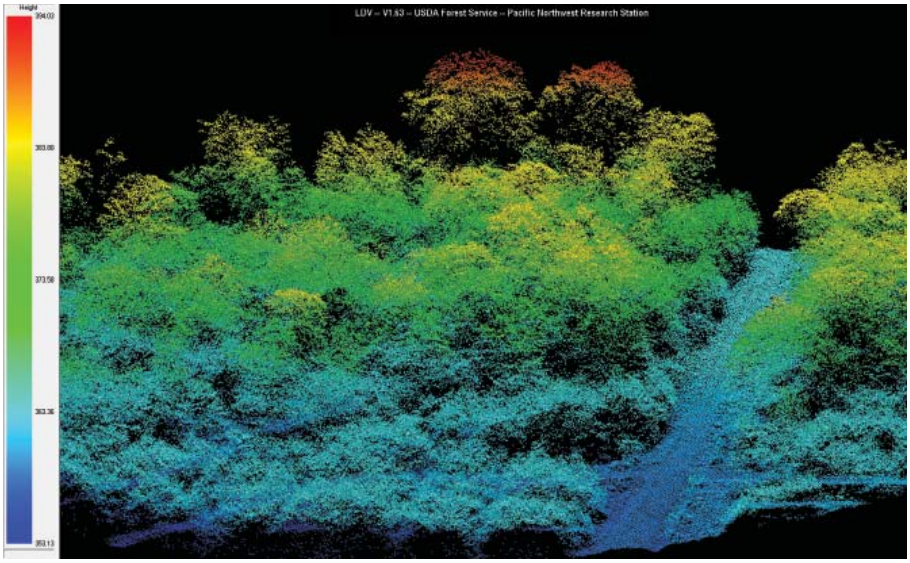
- Le champ de travail de l'équipe « Observation spatiale de l'environnement » (OSE) va de la maîtrise de la donnée satellitaire à celle de l'analyse des flux de données et de leurs éléments saillants, ce qui permet de déterminer les dynamiques environnementales. À partir des données d'observation de la Terre, l'activité principale de l'équipe OSE est de contribuer à la compréhension des interactions qui régissent les systèmes tropicaux, et en particulier ce qu'on appelle les « paysages tropicaux » terrestres, océaniques et anthropiques, ainsi que les processus physiques, biologiques et humains dont ils sont le siège.
- L'équipe « Approche intégrée des milieux et des sociétés » (AIMS) étudie les dynamiques, le fonctionnement et la co-viabilité des systèmes (écosystèmes et socio-systèmes) dans des milieux fragilisés (îles, littoraux, forêts, oasis...) sous contrainte des changements globaux. Elle met l'accent sur les processus de fragmentation, et sur la vulnérabilité et la viabilité des territoires. L'équipe AIMS mobilise la télédétection, l'observation directe du milieu et les enquêtes auprès des acteurs.
- L'équipe « Modélisation, ingénierie des connaissances et analyse des données spatiales » est spécialisée dans la modélisation des connaissances et des données numériques et symboliques dans le domaine de l'environnement. Elle exploite notamment celles issues de la télédétection et d'observations *in situ*.

De manière transversale aux trois équipes, les cinq thèmes suivants sont abordés :

- ontologie des systèmes spatio-temporels ;
- étude intégrée du *continuum* continent-côtier-océan ;
- observatoire des changements environnementaux, des territoires et des paysages ;
- environnement, sociétés et risques sanitaires ;
- co-viabilité des systèmes sociaux et écologiques.

Voir un exemple de projet mené par l'UMR ESPACE-DEV page 65.





◀ *La technologie lidar : une information spatiale utile, utilisable et utilisée.*

L'information spatiale pour le suivi et l'analyse des territoires et des écosystèmes

L'**UMR** ***« Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale »*** **(TETIS – Cirad, AgroParisTech, Irstea)** est structurée autour de deux dimensions scientifiques, l'une thématique (territoires et environnement) et l'autre méthodologique (télédétection et information spatiale). Ces deux axes définissent le champ de recherche de l'unité — l'information spatiale — et son mandat défini comme « la production de connaissances, d'outils et de méthodes pour mieux comprendre les dynamiques et les interactions nature/société et pour accompagner les acteurs dans leur gestion des territoires et des ressources naturelles renouvelables (terres, eau, forêts, biodiversité) ».

L'UMR met en œuvre une approche intégrée de la chaîne de l'information spatiale, de son acquisition à son traitement, en passant par sa gestion et son utilisation par les acteurs. Les recherches sont appliquées à l'agriculture, à l'environnement, aux ressources, aux territoires, à la santé, *etc.* Sur cette base, l'unité consacre une part importante de ses activités à des actions d'enseignement, de formation, d'expertise et d'appui aux politiques publiques.

L'unité TETIS est organisée en quatre équipes de recherche :

- « Acquisition et Traitement de données de Télédétection et d'Observations Spatialisées » : développement d'outils et de méthodes d'acquisition et de traitement de données spatiales pour détecter, identifier, caractériser et suivre des surfaces continentales ;
- « Analyse et Modélisation Spatiales » : analyse et modélisation des structures spatiales et des dynamiques temporelles des systèmes agro-environnementaux ; développement des indicateurs spatiaux pour caractériser ces systèmes et évaluer les incertitudes liées aux modèles et données utilisés ;
- « Système d'Information Spatialisé : modélisation, extraction et diffusion des données et connaissances » : conception et mise en œuvre de systèmes d'information pour traiter les questions liées à la gestion de l'environnement et du paysage, incluant le développement de méthodes d'extraction de données spatio-temporelles ;
- « Usages de l'Information spatiale et Gouvernance » : évaluation et amélioration de la pertinence de l'information géographique en fonction des besoins des utilisateurs pour la gestion et la gouvernance territoriale.

Les recherches s'appuient sur la plateforme de la Maison de la Télédétection et du projet Equipex-GEOSUD *(GEOInformation for SUstainable Development)* à Montpellier. Grâce à ce projet, la Maison de la Télédétection met à la disposition des chercheurs et des entreprises innovantes des données satellitaires, des moyens de calcul, des logiciels spécialisés (traitement d'image, analyse spatiale, information géographique, statistiques…) ainsi que des dispositifs de formation et des capacités d'accueil. •••

Voir un exemple de projet mené par l'UMR TETIS page 74.

Évolution de la gouvernance et de la gestion des territoires et des ressources face aux changements globaux

L'**UMR** ***« Gouvernance, Risque, Environnement, Développement »*** **(GRED – IRD, UPVM)** s'intéresse aux relations que les sociétés dans leur ensemble, mais aussi les individus, entretiennent avec l'environnement. Au cœur de son questionnement, cette double interrogation : comment les nouvelles contraintes et les nouvelles vulnérabilités modifient-elles la gouvernance et la gestion des territoires et des ressources ?

La conservation de la biodiversité et la dynamique des systèmes ruraux constituent, au GRED, un premier axe de recherche. Les sociétés agricoles sont confrontées à la fragilisation des écosystèmes et aux injonctions de conservation liées à la mondialisation des enjeux. Ces politiques connaissent toutefois de profondes mutations. D'une part, elles ne sont plus pensées indépendamment du développement, d'autre part, la problématique de la biodiversité tend à s'imbriquer avec celle du changement climatique, ce qui est source de complémentarités mais aussi de contradictions. Les mesures relatives à l'atténuation des impacts ou à l'adaptation aux changements climatiques illustrent cette évolution avec, par exemple, les négociations sur la séquestration du carbone menées au niveau de la forêt tropicale. Il ressort que ces nouvelles politiques orientent la représentation de la forêt et affectent la vulnérabilité des populations et de l'écosystème.

Un deuxième axe de recherche au GRED traite de gouvernance et de gestion des ressources et des territoires. Ces notions constituent à la fois un objet prioritaire pour les politiques de développement et un enjeu social stratégique, comme en témoignent les conflits et les discriminations qui s'associent à l'accès aux ressources territoriales. Dans ce contexte, un intérêt particulier est porté aux stratégies individuelles et collectives des acteurs impliqués. En effet, contraints par les matrices institutionnelles existantes, ils s'y adaptent, les contournent ou interviennent pour les faire évoluer. La question des échelles de gouvernance paraît alors cruciale, de même que celle de la redistribution des pouvoirs décisionnels suite à l'émergence de nouveaux territoires ou des régimes internationaux. Cette multiplicité des échelles et des acteurs fait s'instaurer des modes de gouvernance hybrides et des situations de pluralisme institutionnel qui, tous deux, sont porteurs de complémentarités ou au contraire de conflits.

Les risques et la vulnérabilité des sociétés et des territoires constituent ainsi un dernier axe de recherche pour les équipes du GRED. Jusqu'ici les efforts publics pour fortifier la résilience se portaient sur la prévention du risque à travers la mise en place d'infrastructures matérielles et territoriales. Ils se tournent depuis peu vers l'accompagnement des phénomènes d'adaptation afin de pondérer les risques. Cependant, la question du rôle des facteurs socioculturels dans la vulnérabilité et celle de l'adaptation des structures sociales et cognitives ne sont pas encore suffisamment abordées. Il s'agit alors d'expliciter ces interrelations et, dans cette perspective, le cas des espaces littoraux et insulaires est particulièrement ciblé. •••

▼ ***Gouvernance décentralisée des ressources.***

Séance d'apprentissage, dans le cadre d'un programme d'étude de la gestion communautaire, réunissant des enseignants, chercheurs, étudiants et membres d'une association paysanne. Les cartes et les schémas servent à la médiation entre les groupes d'acteurs.

© T. Ruf

▲ *Projet pilote REDD+ (*Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation — *« Réduction des Émissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts tropicales »).*
Le projet vise à réduire la conversion des forêts naturelles en cultures vivrières, responsables d'émission de gaz à effet de serre (Ranomena, Nouvelle Aire Protégée COFAV « Corridor Forestier Fandriana-Vondrozo » à Madagascar).

© G. Serpantié

Projet SERENA : enjeux liés aux services écosystémiques

Le projet « Services environnementaux et usage de l'espace rural » (ANR SERENA) porté, entre 2009 et 2013, par les unités de recherche GRED, ART-Dev, Green et Metafort (AgroParisTech, Irstea, Inra, VetAgroSup) traitait des enjeux liés à l'émergence de la notion de « service environnemental » ou « service écosystémique » (SE) et de son inscription dans l'action publique.

La notion de SE prend en compte non seulement la fonction productive des écosystèmes, mais aussi des fonctions de régulation notamment climatiques (comme la séquestration de carbone) ainsi que des fonctions dites culturelles. Ces dernières renvoient aux rôles éducatifs et récréatifs des aires protégées, ainsi qu'au rapport singulier de certaines sociétés à leur environnement. Cette dimension identitaire confère une valeur patrimoniale à certaines pratiques ou à certains paysages et objets menacés de la nature.

Des instruments appelés « paiements pour services environnementaux » (PSE) constituent une illustration de ce type de représentation des relations Nature-Sociétés. Bien que la généalogie des deux concepts (SE et PSE) ait été distincte à l'origine, les acteurs de la conservation de la biodiversité les mettent simultanément en avant dans une logique d'incitation économique, de compensation des coûts de la préservation de la nature ou encore de financement des aires protégées. Ces outils ont pour rôle de valoriser les services rendus par les gestionnaires de l'environnement. Pour ce faire, il est demandé une contribution aux usagers des ressources ou aux bénéficiaires des SE.

La comparaison de trois pays a révélé un état de diffusion du concept et de ses applications très contrasté.

- Au Costa Rica, pays ayant joué un rôle majeur, le concept de SE a diffusé grâce à une politique forestière lancée en 1996. Elle a requalifié en « PSE » une politique antérieure de soutien financier aux propriétés forestières, financée en partie par une subvention publique adossée à une taxe sur les produits pétroliers et, depuis peu, sur l'eau.
- À Madagascar, la notion a été progressivement introduite par la coopération internationale à partir de 2000, dans l'intention de sensibiliser le public à la conservation et de financer durablement les « Nouvelles Aires Protégées » et la gestion communautaire des forêts. Les acteurs de ces projets ont alors misé sur les marchés du carbone, de la biodiversité, de l'eau et du tourisme.
- En France, le concept SE est encore peu popularisé. Dans les milieux de la conservation de la biodiversité, son introduction s'effectue actuellement à travers la loi sur la biodiversité. Au sein de la politique agricole, c'est l'intérêt pour les incitations économiques, *via* les services de régulation rendus par les agriculteurs, qui attire l'attention des acteurs de la nouvelle politique européenne.

L'usage de la notion de SE et son articulation avec les enjeux internationaux (changement climatique, conservation de la biodiversité, gestion durable de l'eau, écotourisme) ont été mis à profit par le secteur environnemental et forestier dans les arènes internationales. Les PSE ont été développés au Costa Rica à une échelle nationale, et à Madagascar à une échelle plus locale (programmes pilotes REDD+ ; plateformes locales pour l'eau et contrats de conservation mises en place par des organisations non gouvernementales). De manière générale, le secteur agricole — et plus généralement les politiques de développement rural — ne se sont pas encore assez approprié cette notion pour pouvoir renouveler leurs pratiques et leurs outils d'intervention. Certains dispositifs existants (écotourisme, certifications environnementales) mobilisent parfois la notion de SE. Cependant, cela relève essentiellement d'un effet de rhétorique destiné à justifier leur légitimité par l'emploi d'une terminologie à la mode.

Contact : Philippe Meral, philippe.meral@ird.fr
Pour plus d'informations : www.serena-anr.org

Changement climatique : une nouvelle contrainte pour les acteurs, les ressources et les territoires en développement

L'**UMR « *Acteurs, Ressources et Territoires dans le Développement* » (ART-Dev – CNRS, UPVM, Cirad, UPVD, UM)** développe des recherches sur les reconfigurations de territoire du point de vue économique, politique et social, en mettant en relation dynamiques de globalisation et dynamiques locales. Ses principales thématiques de recherche concernent les trajectoires de territoires ruraux comme urbains, la question de la gouvernance des ressources naturelles et les enjeux relatifs aux processus de mobilité et de circulation dans la globalisation. Ces thématiques sont examinées à travers les jeux d'échelle territoriale et sous l'angle des politiques publiques. L'unité travaille sur plusieurs continents et dans de nombreux contextes géographiques et politiques présentant de forts contrastes en termes de choix et de niveau de développement. Elle entend valoriser cette richesse par des approches comparatives.

Le changement climatique, facteur de bouleversements environnementaux, mais aussi de tensions socioéconomiques et politiques, constitue une thématique transversale et montante au sein de l'unité (projets « De terres et d'eaux », EcoAdapt, BLUEGRASS). L'UMR travaille en premier lieu à comprendre et à analyser ces impacts en croisant les échelles locale, nationale et internationale. Le changement climatique fait aussi peser de nouvelles contraintes sur la gestion des ressources naturelles, avec notamment le risque de voir émerger des conflits liés à la distribution et à l'appropriation de ces ressources.

Outre cet effort de caractérisation et d'analyse des impacts du changement climatique, les recherches menées au sein d'ART-Dev interrogent également les différentes options existantes pour répondre aux enjeux du changement climatique. Ces options sont de nature politique, institutionnelle, règlementaire, technique et comportementale. Elles se répartissent entre, d'une part, des efforts d'atténuation du changement climatique (intervention humaine pour la réduction des sources ou l'augmentation des puits de gaz à effet de serre et, d'autre part, des stratégies d'adaptation au changement climatique (modification des systèmes naturels ou humains).

Les stratégies d'adaptation peuvent consister à mettre en place des mécanismes économiques incitatifs pour faire évoluer les utilisateurs des ressources naturelles vers des pratiques plus durables. Elles accompagnent ainsi les politiques relatives au changement climatique (projets INVALUABLE et REDE CLIMAT). Par ailleurs, les recherches révèlent que l'adaptation au changement climatique est forcément spécifique au contexte local et qu'il n'existe pas de solution miracle transférable en tout lieu et en toutes circonstances. Ainsi, comme en témoigne le projet CIRCULEX, la complémentarité des différents types et niveaux d'acteurs (des individus aux instances décisionnelles nationales et internationales) s'avère essentielle pour penser et réussir aussi bien ces stratégies d'adaptation que l'articulation entre les différents enjeux environnementaux (climat, biodiversité, eau, désertification, *etc.*).

De terres et d'eaux

Partout sur la planète, les petits producteurs agricoles font aujourd'hui face à des bouleversements simultanés. La transformation rapide des modes de tenure foncière et de gestion de l'eau se conjugue en effet avec le changement climatique. Par exemple, les incertitudes face à la pluviométrie ou à la probabilité croissante d'évènements climatiques exceptionnels coexistent avec d'autres sur le devenir de la tenure foncière ou sur le maintien de modes locaux de gestion de l'eau. Ainsi, les stratégies des agriculteurs ne s'élaborent pas vis-à-vis du changement climatique seul, mais c'est à un ensemble de bouleversements qu'ils sont amenés à répondre de façon simultanée.

Comme l'illustre plus spécifiquement le projet « De terres et d'eaux » auquel participe l'UMR ART-Dev, les agriculteurs développent leurs propres stratégies pour gérer ces conjonctions d'incertitudes. Ce projet étudie les façons dont le rapport à la terre et à l'eau est affecté par ces changements globaux sur des échelles variant du très local au global. A partir de huit cas d'études impliquant un travail de terrain long au Kenya, en Ouganda, au Mozambique, en France, en Espagne, au Népal, au Liban et en Territoires palestiniens, ce projet explore le vécu des acteurs agricoles au niveau local, pour comprendre à la fois la perception qu'ils ont des enjeux auxquels ils sont confrontés et la logique des stratégies qu'ils développent pour y faire face. Le projet s'intéresse également aux processus déterminant ces enjeux aux échelles régionale, nationale et globale.

F. Molle © IRD

▲ *Canal d'irrigation au Liban.*

Cette exploration scientifique permet de mieux distinguer celles des stratégies développées localement qui se révèlent efficaces, de celles qui, au contraire, induisent des vulnérabilités. En effet, ces stratégies sont tout à fait logiques du point de vue du producteur au niveau local, mais elles peuvent induire une vulnérabilité pour l'agriculteur lorsqu'il se trouve confronté à des acteurs agissant au niveau national ou global, comme c'est le cas par exemple avec les investisseurs étrangers ou les organisations d'aide au développement.

Contact : Julie Trottier, julie.trottier@univ-montp3.fr

ACFAO : pour une gestion durable des forêts et l'adaptation au changement climatique des communautés soudano-sahéliennes

© F.Affholder

▲ *Formation forestière au Sénégal, à l'interface des zones cultivées.*

L'objectif général du projet « Forêts et Adaptation au Changement Climatique en Afrique de l'Ouest » (ACFAO) est de contribuer, en zone soudano-sahélienne, au développement de politiques et de projets d'adaptation basés sur les écosystèmes à différentes échelles (locale, régionale et nationale). Il s'agit de renforcer la gestion durable des forêts et de permettre aux groupes sociaux les plus vulnérables d'accroître leurs capacités adaptatives et d'améliorer leurs conditions de vie grâce aux biens et services écosystémiques fournis durablement par les formations forestières.

Ce projet se décline en cinq composantes principales :

- analyser les politiques forestières et d'adaptation (ainsi que leurs liens) en impliquant dans la réflexion les acteurs régionaux, sous-nationaux et nationaux, et identifier les opportunités permettant d'influencer ces politiques ;
- analyser la vulnérabilité actuelle et future des communautés installées sur des sites pilotes, par une approche participative, inter-échelle et intégrative, en mettant l'accent sur les liens entre dynamique des écosystèmes et réduction de cette vulnérabilité ;
- formuler des stratégies d'adaptation qui prennent en compte les services écosystémiques et qui intègrent les stratégies locales des communautés ;
- informer les acteurs impliqués dans le projet (décideurs politiques, experts, praticiens et acteurs locaux) et renforcer leurs capacités ;
- disséminer des informations et créer, dans et en dehors des pays où se développe le projet, des réseaux d'acteurs concernés par l'adaptation au changement climatique et par les services écosystémiques en zone sèche.

Ce projet de 4 ans et de 3,9 millions d'euros, auquel participe l'UR B&SEF *(voir page 35)*, est coordonné par le Centre International pour la recherche forestière (CIFOR), avec un cofinancement du Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) et divers autres cofinancements.

Contact : Denis Gautier, denis.gautier@cirad.fr

Pour plus d'informations : www.ffem.fr/accueil/projets/projets_ffem-par-secteur/Projetschangement-climatique/CZZ1603-AfriqueOuest-ForetAdaptation-ACFAO

Le développement durable et la gestion des ressources vus par les sciences économiques

Le *« Laboratoire Montpelliérain d'Économie Théorique et Appliquée »* **(UMR LAMETA – Inra, Montpellier SupAgro, UM, CNRS)** est une UMR en sciences économiques à vocation généraliste. Il mobilise une pluralité de cadres théoriques et méthodologiques : économétrie appliquée, économie comportementale, économie expérimentale, économie publique, histoire de la pensée et philosophie économique, microéconomie, socioéconomie, théorie des jeux.

L'UMR développe un ensemble de travaux structurés autour de plusieurs axes thématiques. L'axe « Biodiversité, services écosystémiques et ressources naturelles », en particulier, rassemble une large gamme de projets de recherche ayant un champ thématique commun : le développement durable et la gestion des ressources. La majorité de ces travaux de recherche concerne la gestion quantitative et qualitative de l'eau (bassins versants et zones côtières), ainsi que l'un des domaines traditionnels de compétence et de collaboration scientifique sur Montpellier : les contrats agro-environnementaux. Plusieurs programmes de recherche (ANR-Miseeva : « Agence Nationale de la Recherche — *Marine Inundation hazard exposure and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment* » ; Liteau Solter ou « Gestion durable du littoral — SOLidarités TERritoriales et stratégies pour la résilience du littoral à la submersion marine » ; Alternalive Fondation de France) portent sur les risques côtiers (érosion et submersion marine) liés à l'augmentation du niveau de la mer résultant du changement climatique. L'objectif de ces travaux est d'éclairer les décisions publiques sur les politiques d'adaptation au changement climatique (risque d'inondation et de submersion marine) et d'identifier les besoins de sensibilisation et d'apprentissages en termes de gouvernance.

Depuis 2014, plusieurs chercheurs du LAMETA participent au projet pluridisciplinaire ANR « Modélisation pour l'accompagnement des ACteurs, vers l'Adaptation des Couverts pérennes ou agroforestiers aux Changements globaux » (MACACC, *voir page 77*). Ce projet vise à définir différents scénarios de gestion adaptative aux changements globaux, et à tester la capacité des producteurs à les adopter dans des régions du monde tropicales et tempérées. ■

© M Brain

Changement climatique *& biodiversité et écosystèmes*

Les études scientifiques menées depuis plusieurs décennies, qui trouvent un large écho dans le dernier rapport du GIEC, montrent chez beaucoup d'espèces terrestres, dulcicoles et marines, une évolution de l'aire de répartition, des activités saisonnières, des mouvements migratoires, de l'abondance et des interactions interspécifiques découlant du changement climatique en cours. La nature et l'ampleur des perturbations à venir sont difficiles à prévoir et à anticiper, compte tenu de la faible échelle de temps à laquelle elles se produisent et de la diversité des réponses biologiques, mais aussi de la complexité des interactions entre espèces et des espèces avec leur environnement. On peut cependant affirmer qu'elles sont sans précédent sur une aussi courte période dans l'histoire de la Terre.

L'acquisition de connaissances sur la vulnérabilité future, l'exposition et la capacité de réaction des systèmes naturels, interconnectés aux sociétés, constitue donc un défi majeur posé à la science, en raison du nombre de facteurs en jeu et de leurs interactions complexes. Cette problématique est abordée de manière très large et pluridisciplinaire par les équipes de recherche présentes en Languedoc-Roussillon, à travers l'étude des transformations du monde vivant, de l'évolution de la biodiversité et des écosystèmes et de l'adaptation au changement climatique et, ce, à différentes échelles de temps (du court au long terme), d'espace et d'organisation du vivant (des génomes aux écosystèmes).

Ces travaux — qui concernent non seulement des organismes « modèles », mais aussi les spécificités des milieux méditerranéens ou tropicaux — s'appuient en partie sur des observatoires permanents (en milieu terrestre comme en milieu marin) et des plateformes expérimentales de pointe (Écotron, MEDIMEER, Centre national de ressources biologiques marines).

Ce chapitre offre un panorama des unités de recherche régionales qui étudient, d'une manière ou d'une autre, l'impact du changement climatique sur les écosystèmes continentaux, d'une part, et sur les écosystèmes marins, d'autre part.

Les recherches menées visent à comprendre la dynamique et le fonctionnement de la biodiversité (grâce à des démarches d'observation sur le terrain, avec l'appui de l'OSU OREME, et d'expérimentation en conditions contrôlées, couplées à des approches théoriques et à la modélisation). Elles visent également à prévoir les conséquences biologiques des changements planétaires (à l'aide de scénarios), à anticiper l'évolution des services écosystémiques et à définir des modalités de gestion adaptative des espèces et des milieux.

Philippe Jarne (UMR CEFE)
& Philippe Lebaron (OOB)

Biodiversité et écosystèmes continentaux

Une grande partie des recherches menées sur les écosystèmes et la biodiversité continentaux sont fédérées au sein du LabEx CeMEB. Les approches développées font appel à un large *corpus* de disciplines (écologie, biologie des populations, botanique, génétique, physiologie, informatique, *etc.*). Elles ont pour objectif d'étudier la dynamique des écosystèmes et leur réponse aux changements climatiques, en milieu naturel ou pseudo-naturel. Le site expérimental méditerranéen de Puéchabon ou les zones humides des basses plaines de l'Ain fournissent de bons exemples. Les approches se font aussi en milieu contrôlé, par exemple dans les enceintes confinées de l'Écotron, en serre ou en animalerie. Ces approches portent aussi sur les mécanismes d'adaptation des espèces à leur environnement aux points de vue génotypique, phénotypique ou biogéographique. On peut citer, à titre d'exemple, la simulation de l'aire de répartition de plusieurs espèces d'arbre en lien avec les prévisions du changement climatique (projet Evorange).

Les objets d'étude vont des microorganismes aux plantes et aux animaux, portent sur l'ensemble des écosystèmes (terrestres, aquatiques, sols), de l'équateur aux pôles avec une emphase sur les écosystèmes méditerranéens et tropicaux. Ceux-ci sont étudiés dans leurs relations avec les sociétés, afin d'en définir les modalités de gestion adaptative (voir par exemple les projets REDD et INFORMED). Les espèces et communautés d'espèces sont appréhendées aussi bien au niveau de leur diversité, de leur structure, de leur organisation que de leur fonctionnement. Des représentations mathématiques et informatiques des organes, des plantes, des peuplements, des paysages et des processus, sont élaborées à des fins d'analyse ou de prédiction et de simulation. Les sols font l'objet d'une attention particulière, non seulement en tant que substrat nutritif pour les plantes, mais aussi en tant que milieu abritant une riche biodiversité d'organismes essentiels à la réalisation des cycles biogéochimiques. Des méthodes d'ingénierie écologique, par exemple basées sur les symbioses entre plantes et microorganismes et visant à restaurer les milieux dégradés, sont également à l'étude.

Une des forces de la communauté repose sur la prise en compte explicite des relations homme-milieu, par des approches intégrant les sciences humaines et sociales. On peut citer les travaux sur les services écosystémiques ou encore l'évaluation des capacités des écosystèmes en tant que sources ou puits de carbone dans la perspective d'atténuer les effets de l'augmentation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère.

Sophie Boutin (LabEx CeMEB)
& Philippe Jarne (UMR CEFE)

Les structures principales

Écotron européen de Montpellier
(CNRS)
7 scientifiques

LabEx CeMEB
Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité
(UM/UPVM/Montpellier SupAgro/CNRS/IRD/Inra/Cirad/EPHE/Inrap/UNîmes)
630 scientifiques

OSU OREME
Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement
(UM/CNRS/IRD)
10 scientifiques

UMR AMAP
botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations
(Cirad/CNRS/Inra/IRD/UM)
54 scientifiques

UMR CEFE
Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive
(CNRS/UM/UPVM/EPHE/Montpellier SupAgro/IRD/Inra)
86 scientifiques

Suite p. 31

▼ *Éclosion des bourgeons végétatifs et des fleurs femelles de mélèze, stades phénologiques suivis au sein de l'Observatoire des saisons (www.obs-saisons.fr).*

Les événements phénologiques, plastiques face aux conditions environnementales et capables d'évoluer rapidement sous l'effet du réchauffement climatique, constituent des traits adaptatifs majeurs chez les arbres (qui ont un temps de génération long). Ils expliquent une part importante de leur répartition géographique.

© E. Gritti

Partager et transmettre le savoir sur la biodiversité et les écosystèmes face aux changements planétaires

Labellisé « Laboratoire d'Excellence » par le programme « Investissement d'Avenir » 2011-2019 de l'ANR, le « ***Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité*** » **(LabEx CeMEB – UM, UPVM, Montpellier SupAgro, CNRS, IRD, Inra, Cirad, EPHE, Inrap, UNîmes)** est une structure fédérative regroupant huit unités de recherche (AMAP, CBGP, CEFE, Eco&Sols, Écotron, ISEM, LAMETA, MIVEGEC).

Le CeMEB définit des stratégies communes sur ses secteurs d'intervention, en concertation étroite avec les partenaires locaux et régionaux fédérant l'observatoire des sciences de l'univers (OSU) OREME, le DiPEE de Montpellier, le comité thématique d'établissement (CTE) B3E de l'Université de Montpellier et d'autres LabEx*. Il poursuit également des missions d'appui à la recherche (doctorat, post-doctorat), d'animation scientifique (organisation et financement d'ateliers, de rencontres et de programmes de science participative), de formation (public professionnel, enseignants et futurs enseignants du secondaire...), de transfert et de valorisation (portail web en écologie et biodiversité, participation aux Assises de la Biodiversité 2014...).

Le LabEx CeMEB travaille sur les champs disciplinaires suivants :
- dynamique de la biodiversité, écologie et biologie évolutive ;
- rôle fonctionnel de la biodiversité et services des écosystèmes ;
- santé-environnement ;
- socioéconomie de l'environnement ;
- conséquences biologiques des changements planétaires.

Ses objectifs sont :
- de comprendre la dynamique et le fonctionnement de la biodiversité en combinant observation, expérimentation et modélisation ;
- de prévoir les conséquences biologiques des changements planétaires à l'aide de scénarios ;
- d'anticiper l'évolution des services écologiques et des sociétés humaines.

Le projet LabEx CeMEB propose :
- de mettre en place un centre d'expertise et de connaissance sur la biodiversité devant répondre à la croissance des demandes d'intervention du monde de la recherche sur les questions de biodiversité, tant auprès des scolaires ou du grand public que de milieux plus spécialisés. Il aura également pour objectif l'amélioration des capacités d'expertise et d'appui aux décideurs, aménageurs, gestionnaires et autorités publiques ;
- de créer de nouvelles formations au niveau licence et master, et d'ouvrir la formation des doctorants au management et à l'environnement économique, afin de faciliter leur insertion professionnelle. •••

* DiPEE : Dispositifs de Partenariat en Écologie et Environnement ; B3E : Biologie Écologie Évolution Environnement

La réponse de la diversité fongique au changement climatique : l'utilisation de collections d'herbier âgées de 170 ans

Comparer la distribution actuelle de la diversité biologique à ce qu'elle était il y a 200 ans est rendu difficile par la rareté de données anciennes de qualité. Lorsque de telles données existent, elles sont généralement issues d'échantillonnages datant de quelques décennies tout au plus. Lorsque le pas de temps étudié s'allonge, des changements importants interviennent aussi bien en termes de nomenclature des espèces étudiées que de dénomination des lieux d'observation. Par ailleurs, il est fréquent que des données climatiques collectées lors de campagnes aussi éloignées dans le temps concernent les mêmes stations.

L'ensemble de ces contraintes donne une idée de la valeur exceptionnelle des données constituées autour de Montpellier entre 1820 et 1850, par de Candolle et ses successeurs de l'Institut Botanique de Montpellier, et conservées jusqu'à nos jours par l'Herbier de Montpellier. Ces collections constituent ainsi l'un des plus anciens jeux de données mycologiques assemblés en un herbier et localisés avec précision. Ces données sont par ailleurs assignées à des informations climatiques précises, relevées manuellement au moment de l'échantillonnage.

Après un important travail de réassignation nomenclaturale et d'analyse des données météorologiques, ces informations ont été comparées à des relevés réalisés dans la même région sur la période 2000-2010. Les équipes impliquées (Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault, CEFE, Biotope, Laboratoire de Botanique, Phytochimie et Mycologie, Herbier de l'Université de Montpellier, Laboratoire des Sciences Végétales et Fongiques) ont ainsi pu mettre en évidence que, en l'espace de deux siècles, les espèces de champignons décomposeurs et mutualistes ont retardé leur fructification de deux à trois semaines, alors que dans le même temps certains paramètres climatiques (température moyenne, distribution temporelle des pluies) montrent d'importants changements.

Ces grandes tendances connaissent des variations spécifiques parfois fortes et sont modulées par les traits écologiques des espèces (espèces d'arbres associées, type de substrat…), et permettent par exemple de constater que certains champignons largement consommés autrefois, et faisant l'objet d'un commerce à Montpellier, ont aujourd'hui très fortement régressé.

Contact : Franck Richard, franck.richard@cefe.cnrs.fr

© Delile

▲ ***Pivoulade d'éouse, dessin de Delile (Herbier de Montpellier).***

La collybie à pieds en fuseau (Collybia fusipes) ***était aussi appelée « pivoulade d'éouse » lorsqu'elle était vendue sur le marché des Arceaux au début du 19e siècle. Cette espèce s'est aujourd'hui considérablement raréfiée autour de Montpellier.***

Le champ immense des adaptations biologiques aux changements environnementaux

Des microorganismes à l'écosystème, de la plasticité phénotypique aux migrations et à la sélection naturelle, le « ***Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive*** » **(UMR CEFE – CNRS, UM, UPVM, EPHE, Montpellier SupAgro, IRD, Inra)** développe des recherches couvrant une multitude d'aspects par lesquels le monde vivant s'adapte aux changements climatiques. Comprendre et prévoir l'ensemble de ces bouleversements est une tâche ardue face à la complexité :

- des changements (tendances générales, variation régionales ou saisonnières, *etc.*) ;
- de la diversité biologique et de ses champs de réponse (génétiques, phénotypiques, biogéographiques) ;
- des interactions entre ces changements et les différents niveaux de réponse de la diversité biologique.

De par la diversité de ses approches au sein des départements « Écologie Évolutive », « Écologie Fonctionnelle », « Biodiversité et Conservation », et « Interactions, Écologie et Sociétés », le CEFE est un acteur de premier plan dans le développement d'une vision multidisciplinaire et intégrée des changements récents et à venir de nos écosystèmes.

Les recherches qui y sont développées associent des travaux de court et de long termes portant sur de nombreuses classes d'organismes à travers ces trois modes d'adaptation :

- L'adaptation génotypique concerne les processus bien connus sous le nom de « sélection naturelle darwinienne ». La diversité génétique des populations d'organismes est ici le facteur clé de l'adaptation des espèces à travers la sélection des génotypes les mieux adaptés aux changements en cours. La disparition de biodiversité qui en découle au sein des espèces est une source potentielle d'inquiétude pour la résistance de nombreuses classes d'organismes aux successions de changements à venir.
- L'adaptation phénotypique correspond à la plasticité phénotypique, c'est-à-dire à la capacité, à partir d'un génotype unique, de produire plusieurs phénotypes selon les conditions du milieu. Cette plasticité physiologique, morphologique, comportementale ou encore phénologique est dite « adaptative » si elle permet de maintenir ou d'accroître la valeur sélective face aux changements du milieu. Les limites et les coûts de cette plasticité, notamment en conditions d'interactions multitrophiques, jouent donc un rôle crucial dans la capacité des organismes à s'adapter aux changements climatiques.
- L'adaptation biogéographique concerne les espèces capables de migrer ou de se disséminer vers les zones bioclimatiques les plus favorables à leur survie. La capacité des organismes à se propager est très variable entre espèces et dépend du contexte biogéographique de leurs aires de répartition. Face à la rapidité des changements climatiques en cours et au morcellement des aires naturelles par les activités humaines, la capacité de déplacement des populations représente un enjeu majeur d'adaptation aux changements climatiques.

Associer la biologie et la paléontologie pour replacer les transformations du vivant face aux changements climatiques dans le contexte de leur adaptation historique

L'*« Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier »* **(UMR ISEM – CNRS, UM, IRD, EPHE)** réunit paléontologie et biologie des populations. Il a été créé avec la volonté d'encourager la voie de la pluridisciplinarité dans l'approche des transformations du monde vivant.

Les recherches au sein de l'ISEM concernent l'origine et la dynamique de la biodiversité, ainsi que les modalités et les mécanismes de son évolution. Les chercheurs de cette unité s'intéressent aussi bien à la biodiversité actuelle que passée, étudient un large éventail d'organismes et de milieux, et allient des approches de terrain, expérimentales et théoriques. Ces recherches intègrent les questions fondamentales de la biologie évolutive (adaptation, spéciation), l'accélération des moyens de production de données (révolution de la génomique, programmes de science participative), ainsi que le questionnement scientifique et sociétal portant sur les réponses de la biodiversité vis-à-vis des changements planétaires et anthropiques.

Les recherches menées à l'ISEM abordent l'étude de l'adaptation aux changements climatiques à des échelles multiples de temps, d'espace et d'organisation du vivant, depuis l'échelle très fine des génomes jusqu'à celle des écosystèmes. Les réponses adaptatives étudiées vont des modifications physiologiques des organismes (notamment, dans une perspective d'adaptation des pratiques d'aquaculture au changement climatique, *via* l'étude des normes de réaction des œufs, embryons et larves des poissons vis-à-vis de la température) jusqu'aux changements de composition des communautés à très large échelle spatiale.

À partir de jeux de données issus de programmes de science participative, l'ISEM a notamment montré que, à l'échelle de toute l'Europe, les communautés d'oiseaux et de papillons subissent des modifications interprétables dans le cadre du réchauffement climatique, mais aussi que le rythme de réponse des communautés est inférieur à celui de l'augmentation des températures, engendrant une dette climatique pour la biodiversité.

L'étude des réponses de la biodiversité aux changements climatiques passés est, à l'ISEM, une force des recherches sur l'adaptation au changement climatique : cela permet de replacer les défis adaptatifs auxquels les espèces sont confrontées actuellement dans le contexte de leur histoire d'adaptation.

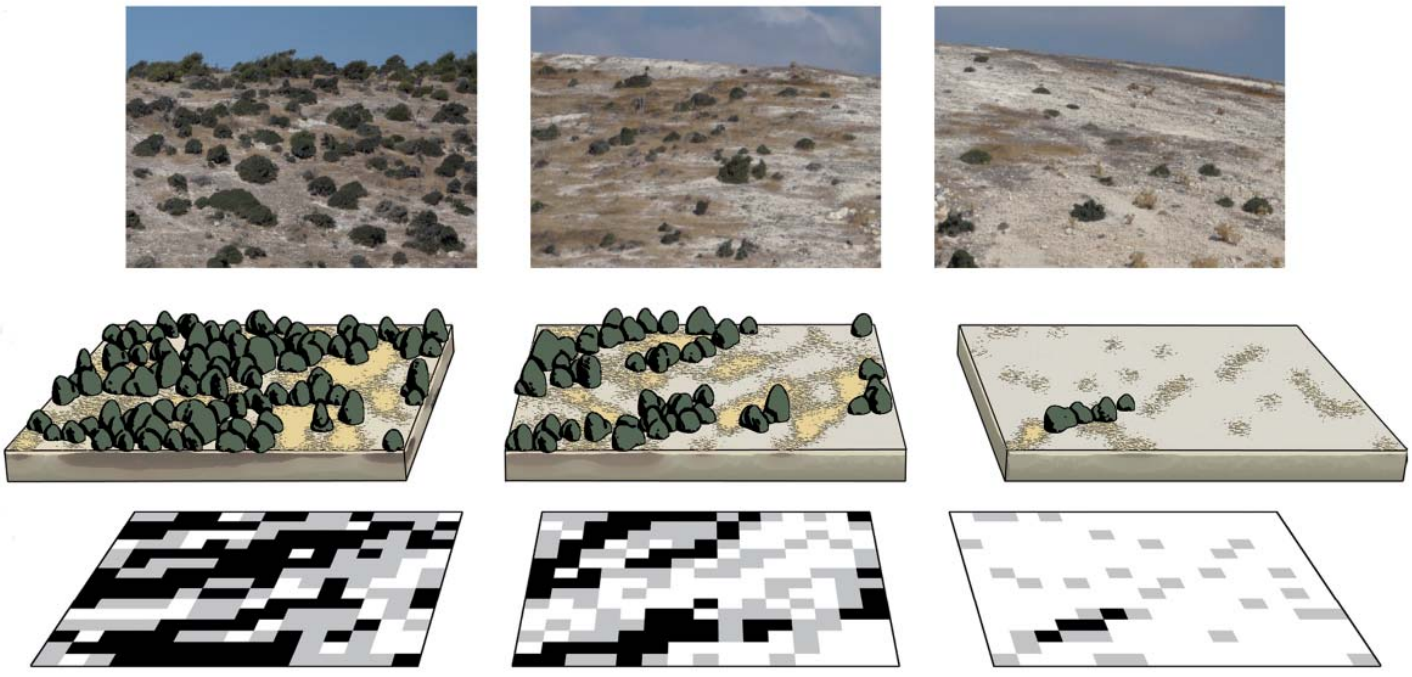
Une autre originalité de l'unité consiste à développer des approches intégratrices alliant l'écologie des communautés et des écosystèmes avec l'évolution. L'ISEM étudie en particulier le rôle des réponses évolutives dans le façonnement des patrons d'extinction, et il développe de nouveaux outils de modélisation pour intégrer ces aspects évolutifs dans les scénarios de devenir de la biodiversité dans le contexte du changement climatique. •••

Les structures principales

UMR ISEM
Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier
(CNRS/UM/IRD/EPHE)
89 scientifiques

UR B&SEF
Biens et Services des Écosystèmes Forestiers tropicaux
(Cirad)
45 scientifiques

UR URFM
Écologie des Forêts Méditerranéennes
(Inra)
15 scientifiques



▲ *Formalisation d'un écosystème aride (haut) en automate cellulaire (bas).*

© F. Schneider

Comment l'évolution affecte-t-elle la dynamique d'extinction et de changements d'aire de distribution dans le contexte des changements globaux ?

Le projet EvoRange*, financé par le programme « Sixième extinction » de l'ANR, a été coordonné par l'ISEM. Il réunissait des équipes de Grenoble (Laboratoire d'Écologie Alpine), de Paris (École Normale Supérieure et Muséum national d'Histoire naturelle) et de Montpellier (CEFE).

Plusieurs questions étaient soulevées par le projet :

❶ Quand l'évolution peut-elle empêcher une population déclinante de s'éteindre ?

❷ Quels sont les rôles respectifs de la migration, de la plasticité phénotypique et de l'adaptation génétique lors des déplacements d'aire prédits par les changements globaux ? Comment ces différents facteurs interagissent-ils ?

❸ Qu'est-ce qui explique que la niche écologique évolue rapidement dans certaines populations ou espèces et qu'elle soit fortement conservée dans d'autres ?

Pour répondre à ces interrogations, l'ISEM et ses partenaires ont mobilisé différentes méthodes complémentaires. Des modèles mathématiques et informatiques sont développés pour simuler, d'une part, l'adaptation d'espèces soumises à un stress et, d'autre part, leur déplacement en réponse à des pressions nouvelles. Les équipes de recherche prennent également avantage des phénomènes d'évolution très rapide des microbes pour observer au laboratoire leur adaptation à différentes conditions stressantes et les facteurs limitant cette adaptation. Par ailleurs, à une échelle très différente, elles utilisent aussi des reconstructions phylogénétiques pour estimer si les préférences climatiques se sont diversifiées rapidement entre espèces proches ou si elles sont restées semblables à celles de l'ancêtre.

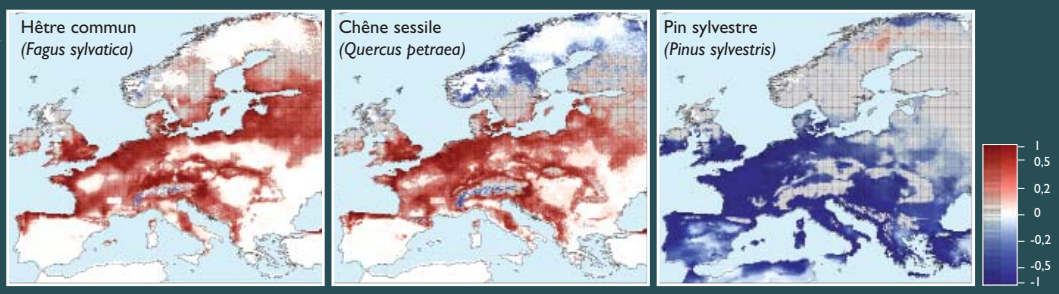
Les modèles développés suggèrent notamment que la dispersion facilite, plus souvent qu'elle ne les contraint, l'expansion géographique et l'adaptation à des conditions nouvelles. Ces contraintes évolutives peuvent être renforcées par certains types de dispersion (comme celle du pollen), par des contraintes génétiques, ou par des patrons de sélection conflictuels sur différents traits adaptatifs. Bien qu'elle soit évoquée fréquemment comme un mécanisme majeur de mitigation des conséquences du changement climatique, la plasticité phénotypique de la phénologie a des conséquences contrastées et très variables selon les espèces sur la persistance des populations d'arbres européens en marge nord et sud de leur répartition.

Contact : Ophélie Ronce, ophelie.ronce@univ-montp2.fr

Pour plus d'informations : http://162.38.181.25/EvoRange

** How does EVOlution affect extinction and species RANGE dynamics in the context of global change?*

© A. Duputie



▲ ***Effet de la plasticité phénotypique sur la persistance de trois arbres forestiers sous scénario de réchauffement climatique (période 2081-2100).***

La date de feuillaison varie en fonction de la température. Ces cartes montrent les zones en Europe où ces variations ont un effet positif (en rouge) ou un effet négatif (en bleu) sur la persistance des arbres. Les zones pointillées sont les zones où chaque espèce peut persister sous ce scénario de changement climatique. Prédictions du modèle PHENOFIT.

Analyser et simuler le développement des écosystèmes végétaux

Les activités de l'**UMR *« botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations »* (AMAP – Cirad, CNRS, Inra, IRD, UM)** relèvent de deux grands champs disciplinaires :

- d'une part, la botanique systématique et structurale, l'écologie de la végétation, l'agronomie et la foresterie ;
- d'autre part, l'informatique, les mathématiques et les statistiques appliquées.

Les équipes ont des compétences scientifiques et techniques originales et reconnues. Leur projet s'articule autour de différents thèmes.

❶ Il est centré sur la caractérisation et l'analyse de la diversité, de la structure et de l'organisation des plantes et des peuplements végétaux.

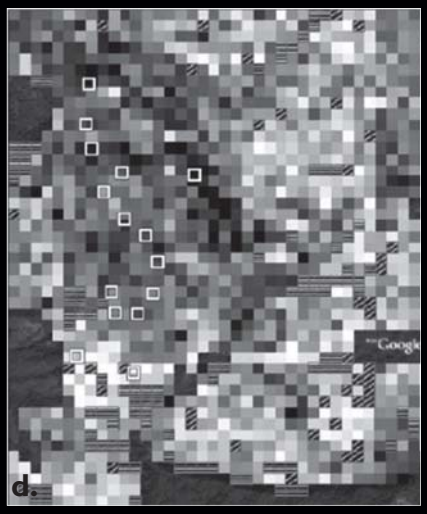
❷ Il aborde des problématiques méditerranéennes, tempérées et tropicales, prend en compte la dimension phylogénétique et évolutive, et s'intéresse aux plantes actuelles ou fossiles, cultivées ou se développant en conditions « naturelles » ou faiblement anthropisées.

❸ Il s'appuie sur des méthodes originales qu'il contribue souvent à développer, telles que l'identification assistée par ordinateur, l'analyse de l'architecture et du développement des plantes, l'analyse biomécanique des végétaux, la représentation mathématique et informatique des organes, des plantes, des peuplements et des paysages, ou encore la modélisation de la croissance et de la dynamique des espèces et des peuplements.

À travers ses projets, l'intention de l'UMR est de fédérer :

- des recherches cognitives, axées sur la description et la compréhension de la diversité de la végétation, de la croissance et du fonctionnement des végétaux, ainsi que des relations structure-fonction et des relations avec les phylogénies, la biogéographie et la systématique ;
- des recherches méthodologiques, visant à proposer des approches et des modèles mathématiques, statistiques et informatiques suffisamment génériques pour analyser, prédire et simuler la structure et le développement, dans des contextes variés, des plantes et de la végétation ;
- des recherches finalisées, orientées vers la maîtrise de la dynamique, de la composition et de la production quantitative et qualitative des écosystèmes végétaux cultivés ou naturels. En particulier, ces recherches concernent les variations de biomasse aérienne des forêts tropicales humides en fonction de différents facteurs naturels ou anthropiques, dans le but d'évaluer les quantités de carbone présentes dans ces forêts. •••

© P. Couteron, N. Barbier & P. Ploton



▲ *Évaluation de la biomasse aérienne des forêts tropicales.*
Exemple de démarche allant de l'évaluation précise des biomasses d'arbres individuels sur des sites de référence (photos a et b), jusqu'à la production, grâce aux images de télédétection (photo c) de cartes de biomasse (photo d).

Inventaire et suivi de la biomasse aérienne des forêts tropicales : une contribution au mécanisme REDD

Face aux objectifs internationaux de maîtrise des quantités de gaz à effet de serre, et face aux enjeux du programme de Réduction des Émissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts tropicales (REDD+), il est important de recenser les stocks de carbone que ces forêts hébergent et ce, d'autant plus que le mécanisme REDD prévoit d'appuyer financièrement les pays tropicaux dans la conservation de ces stocks.

Pour mener à bien un tel projet, l'UMR AMAP a développé des méthodes fiables permettant de suivre dans le temps l'évolution des quantités de carbone séquestrées. Le carbone est majoritairement séquestré dans les parties aériennes des arbres. Il convient de l'estimer de façon cohérente malgré les contraintes liées aux territoires forestiers, qui sont vastes et souvent difficilement accessibles. Les inventaires forestiers de terrain concernent principalement des mesures simples, comme le diamètre du tronc et, exceptionnellement, des mensurations et pesées plus détaillées permettant la calibration des équations allométriques prédisant la biomasse totale des arbres individuels.

Ces inventaires, forcément limités dans l'espace, permettent d'échantillonner les différents types de forêts d'un territoire, et de calibrer les prédictions de la biomasse des arbres à partir de la télédétection (altimétrie laser, analyse du grain de la canopée sur images optiques, mesures radar, *etc.*). Le recours à la télédétection est nécessaire pour obtenir des cartographies généralisant l'information de terrain.

La démarche de l'UMR AMAP se place ainsi à l'interface entre le traitement des informations spatiales et les observations de terrain, en particulier au travers de l'architecture des arbres. Cette conjonction de compétences, dans deux domaines généralement dissociés, permet d'envisager des collaborations plus étroites et plus directes entre la télédétection et la modélisation 3D des structures végétales. Par ailleurs, pour garantir la robustesse et la généricité de ses résultats, l'UMR mène ces recherches dans différentes régions tropicales : Afrique centrale, Guyane française, Inde, Nouvelle-Calédonie et, plus ponctuellement, Brésil et Indonésie.

Contact : Pierre Couteron, pierre.couteron@ird.fr

Projet INFORMED : des recherches intégrées sur la résilience et la gestion des forêts méditerranéennes

▲ *Écosystème forestier mélangé hêtre-sapin (col du Comte, Mont-Ventoux, France).*

© Inra/URFM

Dans le cadre de l'initiative ERA-Net FORESTERRA*, le projet collaboratif INFORMED** (2015-2017) développe une approche pluridisciplinaire sur la résilience des forêts méditerranéennes face au changement global. Cette approche est basée sur le schéma conceptuel suivant : d'une part, le changement global modifie le contexte général d'un système socioécologique au sein duquel la gestion oriente la biodiversité forestière et ses fonctions, ce qui détermine les services écosystémiques ; d'autre part, l'évaluation économique de ces services peut aider le système de gouvernance à choisir les futures options de gestion les plus appropriées.

Le projet, coordonné par l'URFM, est conduit par un consortium de 15 partenaires issus de 10 pays des deux rives de la Méditerranée, alliant des compétences en écologie, gestion forestière, gouvernance et économie.

Le projet INFORMED a trois objectifs scientifiques principaux :

- combler les lacunes relatives aux mécanismes de base qui déterminent la flexibilité des réponses du système socioécologique à la perturbation ;
- intégrer les connaissances en combinant différents modèles basés sur les processus, à des échelles spatiales et temporelles variées ;
- utiliser les connaissances intégrées pour élaborer des stratégies de gestion, et des lignes directrices politiques et de gouvernance à même de favoriser la résilience du système forestier.

Contact : François Lefevre, francois.lefevre@avignon.inra.fr

Pour plus d'informations : www.foresterra.eu

* L'ERA-Net FORESTERRA *(Enhancing FOrest RESearch in the MediTERRAnean through improved coordination and integration)* vise à renforcer la coordination scientifique et l'intégration de programmes méditerranéens de recherches forestières ainsi que la coopération scientifique parmi les pays du bassin méditerranéen et avec d'autres zones sous climat méditerranéen.

** *INtegrated research on FOrest Resilience and Management in the mEDiterranean.*

Forêts méditerranéennes : fonctionnement et dynamiques

L' ***« Unité de Recherche Écologie des Forêts Méditerranéennes »*** **(URFM – Inra)** développe un projet de recherche pluridisciplinaire faisant appel à des compétences en biologie des populations, écologie, écophysiologie, entomologie, génétique, mathématiques appliquées, physique et sciences forestières. Ce projet s'inscrit dans une démarche de recherche finalisée, centrée sur un objet d'étude, les forêts méditerranéennes, pour aborder des questions générales en écologie sur la réponse des écosystèmes complexes et hétérogènes aux changements globaux.

Le projet de recherche de l'URFM sur les dynamiques et le fonctionnement des forêts méditerranéennes intègre trois grands thèmes de recherche, étroitement liés :

- l'étude de la dynamique, de l'utilisation de l'eau et du bilan de carbone dans les forêts mélangées, hétérogènes dans leur composition et la structure de leurs communautés ;
- une approche démo-génétique de la dynamique évolutive des populations d'arbres et d'insectes phytophages à différentes échelles spatiales ;
- une approche de l'écologie du feu basée sur la connaissance des mécanismes physiques du comportement et des impacts du feu.

© Inra/URFM

▼ *Étagement altitudinal de végétation d'arbres forestiers.*

Sur chacun de ces thèmes, l'URFM allie démarches expérimentale et de modélisation.

Les productions de l'unité sont avant tout académiques, mais l'URFM participe aussi activement au transfert des connaissances sous diverses formes. L'unité est par ailleurs fortement investie dans l'espace européen de la recherche.

Favoriser l'adaptation au changement climatique des systèmes écologiques et sociaux forestiers tropicaux

Le projet scientifique de l'**UR** ***« Biens et Services des Écosystèmes Forestiers tropicaux »*** **(B&SEF – Cirad)** est, d'une part, d'étudier l'écologie des forêts tropicales et, d'autre part, de définir, de mettre en œuvre et d'évaluer les politiques, règles, pratiques ou instruments liés à ces écosystèmes.

L'objectif général est de faciliter l'adaptation des systèmes écologiques et sociaux aux contraintes et aux opportunités résultant des changements globaux. C'est également de renforcer au profit des populations, à l'échelle locale aussi bien que globale, la durabilité des services fournis par les écosystèmes forestiers tropicaux.

À travers ces recherches, l'UR s'efforce de répondre à deux problématiques transversales :

- Systèmes écologiques et sociaux forestiers tropicaux : quelle est l'opérationnalité du concept pour le dialogue entre sciences écologiques et humaines, et la modélisation des interactions Homme-Nature sur les ressources forestières ?
- Caractéristiques des écosystèmes forestiers tropicaux, valeur des services écosystémiques et paiements pour services environnementaux : quelles relations, à quelles échelles ?

L'UR B&SEF s'organise autour de trois équipes de recherche : « Résilience des écosystèmes forestiers tropicaux face à l'exploitation et aux changements globaux », « Relations entre résilience des écosystèmes et vulnérabilité des sociétés dans les systèmes écologiques et sociaux forestiers » et « Politiques et instruments de l'action publique concernant les forêts tropicales ».

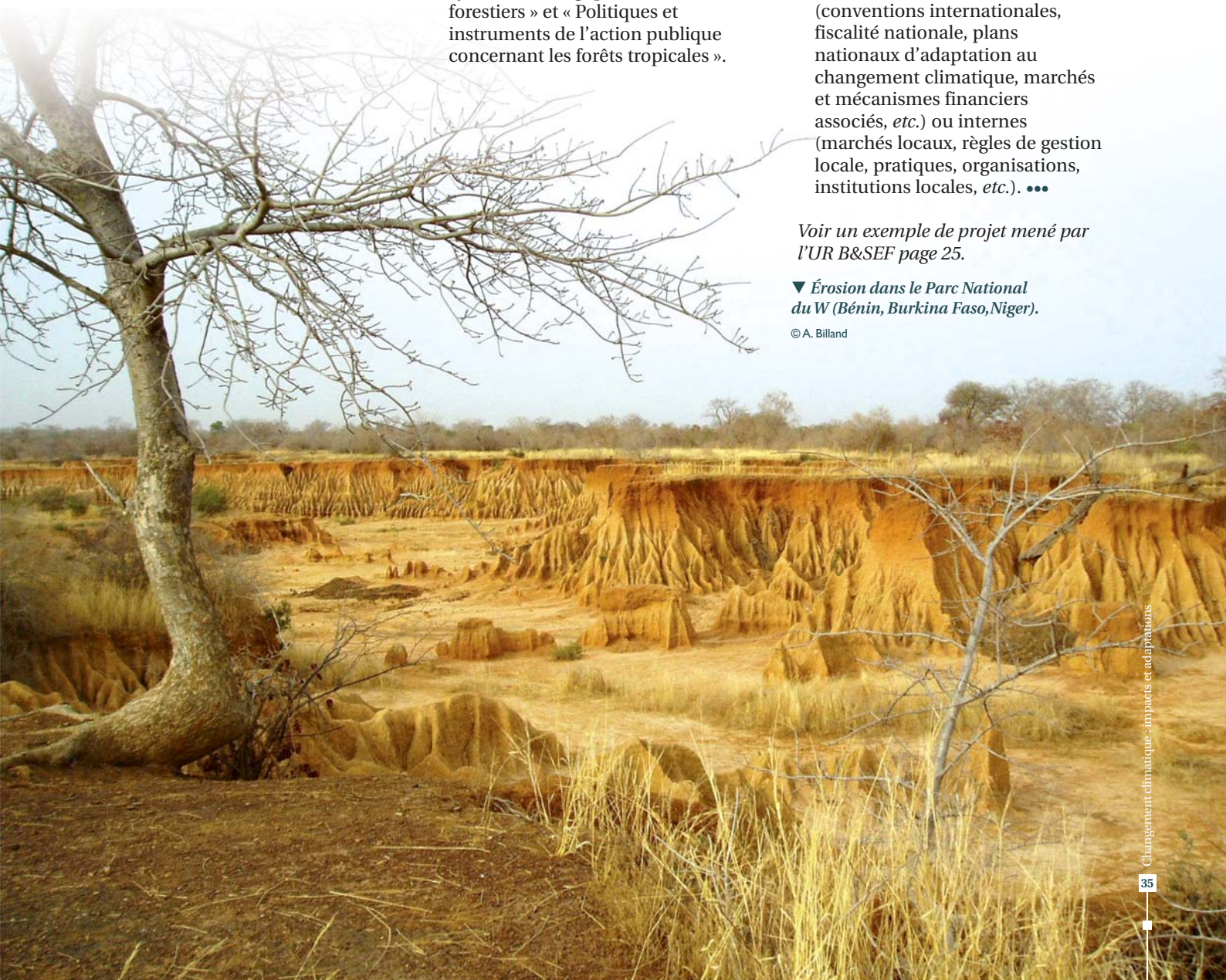
Elle se fixe également trois objets d'étude :

❶ Les forêts tropicales. Elles représentent un enjeu de développement en raison de leur potentiel à produire des biens et des services essentiels à nos sociétés. Elles sont en effet au cœur des grands changements globaux et constituent le plus riche réservoir de carbone et de biodiversité terrestre.

❷ Les sociétés qui y vivent ou en dépendent. L'UR B&SEF étudie les règles, pratiques, usages, savoirs et représentations liés aux forêts et à la construction de capital social, ainsi que leurs dynamiques rattachées de coopération ou de compétition.

❸ Les politiques publiques. Les politiques ou instruments qui s'appliquent aux forêts peuvent être externes au système écologique et social étudié (conventions internationales, fiscalité nationale, plans nationaux d'adaptation au changement climatique, marchés et mécanismes financiers associés, *etc.*) ou internes (marchés locaux, règles de gestion locale, pratiques, organisations, institutions locales, *etc.*). •••

Voir un exemple de projet mené par l'UR B&SEF page 25.



▼ ***Érosion dans le Parc National du W (Bénin, Burkina Faso,Niger).***

© A. Billand

▼ *La plateforme d'observation et d'expérimentation de Puéchabon, intégrée à la très grande infrastructure européenne ICOS* (Integrated Carbon Observation System), *permet d'observer et de mesurer la dynamique de la forêt méditerranéenne.*

© R. Joffre

La plateforme de Puéchabon : site d'étude de l'impact du changement planétaire sur la forêt méditerranéenne

La forte amplitude des changements climatiques attendus pour la région méditerranéenne (intensité et durée des périodes de stress, fréquence des sécheresses extrêmes) en fait un des principaux *hot-spot* de bouleversement identifié par les climatologues. Trois caractéristiques fondamentales des changements en cours (augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique, augmentation de la température et modifications des précipitations) affectent très directement le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Ces modifications impactent les échanges de matière (eau, carbone, azote) et d'énergie à l'interface biosphère-atmosphère, en altérant significativement les flux de matière au sein de la zone critique.

Basée sur des méthodes de micro-météorologie, l'instrumentation du site de Puéchabon (dispositif faisant partie de l'OREME) permet de quantifier ces flux à toutes les échelles de temps, de la seconde à l'année. À l'échelle régionale, les changements de flux de matière vont se répercuter directement sur les termes des bilans hydrologiques des bassins versants et sur les apports aux écosystèmes côtiers. Outre ces impacts directs, les changements climatiques couplés aux changements d'usage des terres vont transformer profondément le régime des perturbations, et principalement des incendies.

Afin de suivre le fonctionnement et la biodiversité des écosystèmes forestiers régionaux face à ces changements, le site de Puéchabon est intégré à deux réseaux : celui des Stations expérimentales méditerranéennes forestières (SEMAFOR) et celui des Stations expérimentales méditerranéennes de terrain (STEXMED). Il est également relié au réseau européen *Experimentation in Ecosystem Research* (ExpeER) et au réseau international de réseaux régionaux FLUXNET (Amérique, Europe, Asie, Océanie) coordonnant l'analyse quantitative régionale et planétaire des échanges de matière et d'énergie à partir de sites expérimentaux instrumentés à l'aide de tours micro-météorologiques.

Contact : Richard Joffre, Richard.JOFFRE@cefe.cnrs.fr

Pour plus d'informations : http://cefe.cnrs.fr

Un observatoire pour évaluer l'impact des changements climatiques et anthropiques sur les des milieux méditerranéens

« L'Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement » **(OREME – UM, CNRS, IRD)** est un Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) dédié à l'étude des aléas et de la vulnérabilité des milieux méditerranéens. Il se focalise sur les risques naturels et l'impact des changements globaux et anthropiques sur l'espace méditerranéen vivant et inerte.

Il a pour mission :

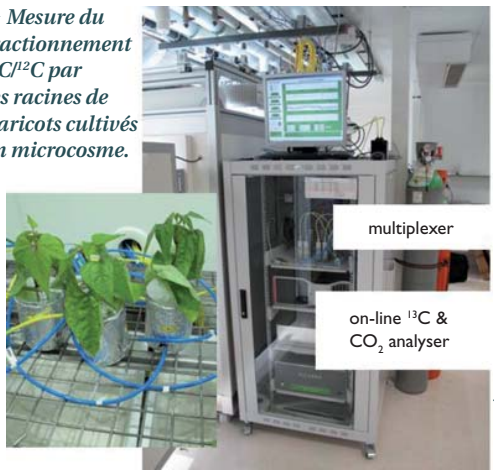
- de soutenir l'activité et le développement d'observations systématiques en sciences de l'univers et de l'environnement ;
- de soutenir la construction de bases de données environnementales ouvertes, partagées et référencées au niveau international ;
- d'encourager la mutualisation des savoir-faire et des moyens analytiques (observation, expérimentation, modélisation) ;
- de constituer le relais local des réseaux nationaux d'observations et de se positionner en acteur fort des actions en environnement tournées vers la Méditerranée.

La mission essentielle de l'OREME consiste à récolter, intégrer et partager les données hétérogènes associées à ces disciplines et à établir des corrélations qui ne pouvaient l'être au préalable. À la clé de cette mise en adéquation des données : la découverte de signaux systématiques permettant de juger de l'effet du changement climatique et/ou anthropique et d'en comprendre les mécanismes (aléas, vulnérabilité) dans ses effets environnementaux.

J. Roy © Écotron

▲ *Ecotron de Montpellier, en arrière-plan, les dômes des macrocosmes.*

▶ *Mesure du fractionnement $^{13}C/^{12}C$ par les racines de haricots cultivés en microcosme.*



C. Piel © Écotron

L'Écotron de Montpellier une plateforme expérimentale à disposition de la communauté scientifique internationale

« ***L'Écotron européen de Montpellier*** » (**CNRS**) est une plateforme de recherche expérimentale dédiée à l'étude de l'impact des changements climatiques sur le fonctionnement des écosystèmes et leur biodiversité. L'insertion dans les enceintes de l'Écotron de blocs d'écosystèmes, intacts ou reconstitués, permet à la fois de contrôler leur environnement dans une large gamme de conditions climatiques et de chimie atmosphérique, et de mesurer en continu les variations des principaux cycles biogéochimiques sous l'effet de facteurs de forçage imposés. L'Écotron donne donc directement accès à des paramètres d'intérêt écologique ou agronomique dans des scénarios climatiques à venir ou passés.

Les paramètres environnementaux contrôlés sont : la température (-10 à +50 °C), l'humidité relative de l'air (20 à 80 %), les précipitations (aspersion ou goutte à goutte), le CO_2 atmosphérique (200 à 1000 ppm), la lumière (intensité et composition spectrale) et le rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ de l'air. Les fonctions de l'écosystème mesurées en ligne sont : l'évapotranspiration, le flux net de CO_2 de l'écosystème, la respiration du sol, le flux de méthane, et le fractionnement isotopique $^{13}C/^{12}C$ dans la molécule de CO_2.

Ces paramètres permettent de calculer des bilans de masse pour plusieurs molécules ainsi que l'efficience d'utilisation des ressources de l'écosystème (efficience de l'eau, de l'azote, de la lumière, du carbone). Classiquement, beaucoup d'autres paramètres peuvent être mesurés sur des échantillons, prélevés dans ces écosystèmes, que l'Écotron stocke et conditionne (sous forme lyophilisée par exemple) et qui sont ensuite analysés dans d'autres laboratoires.

Les trois plateformes de l'Écotron permettent de travailler à des échelles différentes :

- Les « Macrocosmes » sont des enceintes de 40 m^3, chacune pouvant accueillir des lysimètres de 2 à 12 tonnes, pour une surface de 2 à 5 m^2 et une profondeur allant jusqu'à 2 m.
- Les « Mésocosmes » sont des enceintes de 2 à 4 m^3. Elles peuvent accueillir des lysimètres de 0,4 à 1 m de profondeur et de 0,4 à 1 m^2 de surface.
- La plateforme « Microcosmes » se compose de chambres de culture (1 m de hauteur et 1 m^2 de surface utile) dans lesquelles plusieurs dizaines de microcosmes variés (micro-lysimètres avec plantes photosynthétiques, micro-containers avec sol…) peuvent être insérés.

Un minimum de 12 enceintes est disponible dans chaque plateforme afin de permettre l'étude de l'impact de plusieurs facteurs et de leurs interactions, ou encore afin de constituer une série de scénarios successifs permettant l'analyse de la linéarité des réponses et des points de basculement.

L'Écotron de Montpellier est ouvert à la communauté scientifique nationale et internationale dans les domaines de l'écologie, de l'agronomie, de la biologie et des géosciences.

Un appel à projets permanent est d'ailleurs disponible, avec les modalités de soumission et d'acceptation des projets, ainsi que la description et les coûts de fonctionnement de chaque plateforme, sur le site : **www.ir-ecotrons.cnrs.fr** ■

Quelques exemples de recherches menées à l'Écotron

H. Raguet © CNRS

◀ *Insertion de blocs intacts d'écosystème prairial dans un des macrocosmes.*

L'impact des évènements climatiques extrêmes attendus vers 2050 sur les flux de carbone et d'eau d'une prairie de moyenne altitude a montré que l'effet délétère d'une vague de chaleur et d'une sécheresse pouvait être annulé sous l'effet de l'augmentation du CO_2 atmosphérique des décennies à venir.

Une autre expérimentation sur la décomposition de la litière forestière méditerranéenne a montré l'effet de synergie entre la diversité fonctionnelle de la litière, celle de la macrofaune détritivore et la stabilité de ce fonctionnement dans une situation de sécheresse modérée.

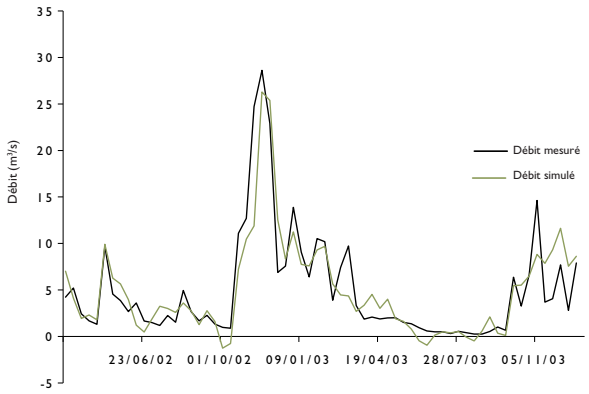
Les changements climatiques vont altérer la diversité biologique dans les écosystèmes. À cet effet, l'Écotron a montré par quels mécanismes physiologiques, à l'échelle de la canopée, la diversité de la communauté végétale peut augmenter l'efficience d'utilisation de l'eau, de l'azote et de la lumière et *in fine* de la production primaire.

La modélisation des cycles biogéochimiques est nécessaire pour prédire l'impact des changements climatiques. L'Écotron a récemment pu identifier que le rythme circadien, largement significatif à l'échelle de l'écosystème, la température et la sécheresse de l'air ont des rôles additifs dans la régulation des flux de CO_2 et de H_2O. Il a également montré que le rythme circadien devrait être incorporé dans la modélisation de ces flux.

▲ *Lônes, bras morts de l'Ain, anciens méandres abandonnés à la faveur des crues.*

© A. Johannet

L'évolution des zones humides de la basse plaine de l'Ain



▲ *Simulations du débit de la rivière Albarine (affluent de l'Ain) avec les réseaux de neurones.*

Le projet NEUROHYDRO, réalisé par le LGEI *(voir p.38)* et le Centre SITE de l'École des Mines de Saint-Étienne, s'inscrit dans le cadre du projet ANR WETCHANGE* qui vise à établir, à l'horizon 2030-2050, des prévisions de réponses de zones humides aux étiages provoqués par le changement global, à partir de différents scénarios climatiques. Ces réponses sont étudiées en termes de fonctionnement hydrologique mais aussi biologique.

La zone étudiée concerne la basse vallée de l'Ain (France), située à environ 40 km au nord-est de Lyon. Les nombreuses zones humides présentes dans ce secteur abritent des écosystèmes particulièrement diversifiés. L'objectif du projet était de développer un modèle fondé sur les réseaux de neurones pour les bassins de l'Ain, couplé avec un modèle maillé aux différences finies, afin d'étudier les évolutions de la ressource en eau en liaison avec les évolutions de variables climatiques issues de plusieurs scénarios de prévision du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC).

Le projet a permis de fournir une simulation de l'évolution de ces zones humides soumises à de nombreux enjeux (irrigation, préservation de la biodiversité). Les échanges nappe-rivière ont également été étudiés sur le bassin karstique de la Cèze (Gard, France).

Le modèle couplé a ensuite été alimenté par des prévisions de précipitation issues de modèles de prévision climatiques du GIEC (période 2010-2040), de manière à comparer les impacts des différents scénarios sur la biodiversité et sur la ressource (eau potable et irrigation).

Les résultats portent plus précisément sur les échanges hydrauliques entre la nappe et la rivière de l'Ain, en rive droite et en rive gauche. Là où la rivière alimente la nappe, il est possible de prélever les ressources en eau souterraine par captage pour l'irrigation ou l'eau potable. Lorsque la rivière draine la nappe, ce n'est en revanche pas possible, en particulier si l'incision du lit de la rivière est importante. En cas de pollution de la rivière ou de la nappe, la connaissance de ces échanges est fondamentale pour prendre les mesures de protection nécessaires. Les prévisions climatiques (2040, 2070) ont permis d'évaluer les impacts sur ces échanges nappe/rivière et l'assèchement potentiel des bras morts et des lônes de la rivière.

Contact : Anne Johannet, anne.johannet@mines-ales.fr

Pour plus d'informations : www.graie.org/wetchange

* Le projet Wetchange (Biodiversité et fonctions des zones humides en réponse aux étiages sévères induit par le changement global) rassemble trois partenaires : le CNRS, l'École nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne et l'Irstea.

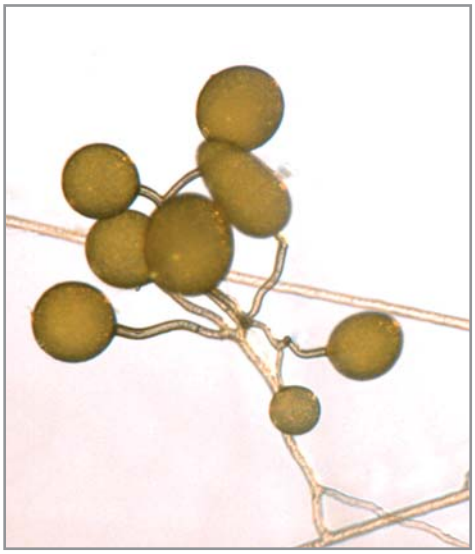
Communautés microbiennes du sol et changements climatiques

Au sein des écosystèmes terrestres, l'activité des communautés microbiennes est l'une des principales sources de CO_2, un puissant gaz à effet de serre. Leur activité produit en effet plus de CO_2 par an que la combustion de combustibles fossiles.

L'UMR Eco&Sols *(voir p.77)* a mené des études pour vérifier la capacité des communautés microbiennes à s'adapter aux changements climatiques. Les travaux de l'unité ont porté sur les effets d'une élévation de la température sur la respiration du sol lors d'expériences de laboratoire en milieux contrôlés. Cette fonction ne semble pas être altérée lorsque la température ne dépasse pas 40°C. Dans cette gamme de température, la disponibilité d'un substrat carboné conditionne l'activité des communautés microbiennes. Au delà de 40°C, l'activité respiratoire est stimulée alors que la biomasse microbienne décroît.

Un travail complémentaire, portant spécifiquement sur l'impact d'un stress thermique ponctuel (60°C durant 16h) sur la diversité des communautés microbiennes, indique que les communautés qui résistent à ce stress s'adaptent à un changement ponctuel de leur environnement. Ces travaux ont mis en évidence une modification du métabolisme des communautés microbiennes du sol exposées à un stress thermique.

Contact : Tiphaine Chevallier, tiphaine.chevallier@ird.fr



Y. Prin © Cirad - LSTM

◀ *À gauche : Spores de champignon mycorhizien à arbuscules* (Glomus intraradices).
À droite : Nodules de Rhizobium.

Valoriser la symbiose mycorhizienne pour limiter les processus d'érosion hydrique

L'un des impacts, très probable, des aléas climatiques sur l'environnement est une altération de la structure du couvert végétal et, en conséquence, une fragilisation des sols aggravant les phénomènes d'érosion hydrique, pour aboutir à un appauvrissement de la fertilité des sols en éléments biodisponibles pour la plante.

Dans ce contexte, il est nécessaire d'améliorer la capacité du végétal à avoir accès à ces ressources minérales (azote et phosphore en particulier) mais aussi d'augmenter sa tolérance à des conditions environnementales peu propices à son développement. À cette fin, le LSTM *(voir p. 55)* développe des stratégies d'ingénierie écologique visant à optimiser l'activité des microorganismes symbiotiques du sol (champignons mycorhiziens, *rhizobia*...) au service de leur partenaire végétal.

Différentes pratiques ont ainsi été élaborées en foresterie et en agroécologie *via* :

- une approche dite « holistique », en favorisant le développement du potentiel mycorhizien et rhizobien des sols par l'insertion, dans l'itinéraire sylvicole, de plantes hypermycotrophes (ou plantes nurses) ;
- ou une approche dite « réductionniste », en dotant le plant forestier ou la plante cultivée d'un statut mycorhizien optimal (colonisation maximale de son système racinaire par des symbiotes fongiques et rhizobiens).

Les résultats montrent qu'il est possible de revégétaliser durablement des surfaces érodées issues de la manifestation de phénomènes d'érosion hydrique et, ainsi, d'adapter des stratégies culturales aux modifications environnementales attendues dans le cadre du changement global.

Contact : Robin Duponnois, Robin.Duponnois@ird.fr

Pour plus d'informations : http://umr-lstm.cirad.fr

▼ *Effet de l'inoculation par différentes souches de* rhizobia *sur la croissance de* Dalbergia *sp.*

Y. Prin © Cirad - LSTM

Biodiversité et écosystèmes marins

Les structures principales

Centre national de ressources biologiques marines EMBRC-France
(European Marine Biological Resource Centre)
(UPMC/CNRS)
90 scientifiques

OOB
Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer
(UPMC/CNRS)
80 scientifiques

UMR BIOM
Biologie Intégrative des Organismes Marins
(UPMC/CNRS)
15 scientifiques

UMR CEFREM
Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens
(UPVD/CNRS)
30 scientifiques

UMR LECOB
Laboratoire d'Écogéochimie des Environnements Benthiques
(UPMC/CNRS)
12 scientifiques

Suite p. 44

Les études de prospective, à différentes échelles territoriales, spécifiques aux enjeux et aux risques induits par le changement climatique, doivent permettre de retracer la chaîne d'impacts, depuis les phénomènes qui risquent de se conjuguer jusqu'à leurs conséquences sur les activités humaines. De telles méthodes nécessitent ainsi un croisement de disciplines scientifiques (climatologie, océanographie, géomorphologie, économie, sociologie, géographie...). Tous ceux qui souhaitent engager des politiques d'anticipation et d'adaptation ont besoin de cette connaissance pluridisciplinaire organisée comme un socle scientifique à adapter à chaque situation géographique, économique et environnementale.

Même s'il existe aujourd'hui encore beaucoup d'incertitudes sur le rythme de modification future des climats — et surtout sur les manifestations locales des phénomènes climatiques à venir — de nombreuses équipes scientifiques d'Agropolis étudient l'impact des pressions anthropiques et du réchauffement climatique sur la biodiversité marine et le fonctionnement des écosystèmes Méditerranéens (MARBEC, CEFREM, BIOM, LECOB, LOMIC, LBBM). Souvent très pluridisciplinaires, ces unités de recherche étudient notamment les impacts directs et indirects du changement climatique sur les écosystèmes littoraux, côtiers et hauturiers, sur les flux de matière aux interfaces terre/mer, sur les modifications du trait de côte, des habitats et des aires de distribution des espèces et sur leurs interactions et leurs conséquences sur le fonctionnement des réseaux trophiques.

Ces travaux s'appuient sur des services d'observation adossés à des observatoires et parfois à des unités (OREME et OOB, CEFREM) qui enregistrent sur le long terme l'évolution des paramètres physico-chimiques et biologiques du milieu marin.

Enfin, plusieurs dispositifs d'expérimentation sont également disponibles et ouverts à l'ensemble de la communauté régionale, nationale et européenne pour mener des expérimentations en conditions contrôlées (MEDIMEER). Il est aussi possible d'accéder à une large diversité d'organismes *in situ* ou *ex situ* et à de multiples services logistiques et analytiques au sein de l'EMBRC, infrastructure à vocation nationale et européenne.

Philippe Lebaron (OOB)

▲ *Banc de barracudas (Sicile).*

Un observatoire méditerranéen pour étudier et enseigner la biologie marine et l'océanographie

« L'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer » **(OOB – UPMC, CNRS)** est un lieu privilégié pour l'étude de la biologie marine et de l'océanographie en Méditerranée. Bénéficiant d'un environnement exceptionnel par la diversité de ses biotopes, de sa faune et de sa flore, les missions de l'OOB concernent la formation, la recherche, l'observation, l'accueil et la vulgarisation scientifique.

L'adaptation des écosystèmes au changement climatique est l'un des axes forts de sa mission d'observation et de suivi à long terme des écosystèmes avec, à disposition de l'observatoire : une composante terrestre créée en 1973 (réserve naturelle de la forêt de la Massane) et une composante marine créée en 1974 (réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls). Le rôle de l'observation a été renforcé en 1985 avec l'obtention du statut d'« Observatoire Océanologique » pour le laboratoire Arago de l'OOB. Face aux rapides changements des conditions climatiques, il est important de développer les connaissances sur les dynamiques temporelles et spatiales des écosystèmes afin de prédire à la fois leurs évolutions et les conséquences que ces changements peuvent avoir sur les services écosystémiques. Or, seules de longues séries de mesures permettent de décrire l'évolution naturelle ou perturbée d'un système présentant une variabilité saisonnière et/ou interannuelle importante.

L'OOB dispose aujourd'hui de trois stations d'observation fixes localisées le long du gradient côte-large. Elles font l'objet d'un suivi régulier (hebdomadaire à mensuel) de paramètres physiques, chimiques et biologiques. Ces séries ont débuté en 1997 pour la station la plus côtière et en 2003 pour la station du large. L'ensemble de ces données est intégré à des réseaux d'observation nationaux : SOMLIT* pour le Service d'Observation du Laboratoire Arago (station côtière SOLA) et MOOSE** pour l'Observatoire Microbien du Laboratoire Arago (station du large MOLA***). Depuis 2010, certains paramètres sont par ailleurs acquis à haute fréquence et en temps réel.

L'OOB est une école interne de l'université Pierre et Marie Curie. Il propose, dans le domaine de l'océanographie, des formations universitaires en lien avec les problématiques du changement climatique. L'observatoire a également mis en place le centre de médiation scientifique « Biodiversarium », qui regroupe un aquarium public en cours de rénovation et d'extension et un jardin méditerranéen. Tous deux accueillent des publics, allant des scolaires au grand public, afin de les sensibiliser, d'une part, à la biodiversité terrestre et marine et, d'autre part, à l'effet des changements globaux (et notamment climatiques) sur la biodiversité. •••

* Service d'Observation en Milieu LITtoral, http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr
** *Mediterranean Ocean Observing System on Environment.*, www.moose-network.fr
*** La station MOLA *(Microbial Observatory Laboratoire Arago)* est située sur le flanc nord du canyon Lacaze-Duthiers, http://sooob.obs-banyuls.fr/fr/les_sites_d_observation.html

© CNRS

▲ *Le navire instrumenté* Néréis II *du CNRS.*

© L Zudaire - CNRS - OOB

▶ *Bouée Océanographique de l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer.*

Suivi temporel de la dynamique de l'écosystème côtier méditerranéen

La problématique générale du Service d'Observation du Laboratoire Arago de Banyuls-sur-Mer (SOLA, OOB) concerne directement l'impact du changement global sur les zones côtières et son importance relative par rapport aux activités humaines locales (global *vs* local).

Le site SOLA a été choisi comme représentatif d'une situation de « normalité » qu'on peut caractériser ainsi : à partir du suivi de paramètres pertinents à des échelles temporelles adaptées, il est possible de définir une typologie des fluctuations saisonnières et interannuelles. Conscients des problèmes posés par la représentativité d'un point unique dans une rade, les membres de l'OOB ont pris soin de fédérer les recherches littorales entreprises par le laboratoire Arago (notamment les travaux effectués sur le couplage bentho-pélagique).

Ce développement d'une démarche systématique d'observation des milieux littoraux est donc issu d'initiatives locales, fondées sur des opportunités et sur une tradition de culture scientifique (Réseau des Stations et Observatoires Marins). C'est dans cet esprit que le Service d'Observation en Milieu Littoral a été mis en place en 1995, et labellisé par l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS en 1996. Ce service regroupe actuellement neuf stations marines.

Contact : Pascal Conan, pascal.conan@obs-banyuls.fr

Des recherches scientifiques pluridisciplinaires sur l'environnement côtier

Le ***« Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens »*** **(UMR CEFREM – UPVD, CNRS)** s'intéresse depuis longtemps à l'environnement côtier, ce qui le rapproche des problématiques socioéconomiques liées aux usages de ce milieu. Son activité de recherche est focalisée sur le thème des transferts de matière et d'énergie aux interfaces du système côtier, ce qui comprend les échanges physiques des masses d'eau, des particules et des éléments, en particulier du carbone, dans le *continuum* continent-océan.

Toute cette activité se déroule dans le cadre de programmes internationaux, nationaux et régionaux. Créé en 1963 autour d'un noyau de géologues et de sédimentologistes, le laboratoire initial s'est progressivement ouvert à la pluridisciplinarité pour évoluer jusqu'à devenir, en 1997, « le CEFREM ». L'équipe actuelle comprend sédimentologistes, géochimistes, biologistes et physiciens.

En collaboration avec l'Ifremer et Météo France, et afin d'observer sur le long terme les effets du changement climatique et ceux induits par les activités anthropiques en Méditerranée Nord-occidentale, le CEFREM participe au SOERE MOOSE* (2010-2020), un réseau d'observation multi-site et intégré.

L'objectif premier de ce programme est de pérenniser les séries temporelles, d'harmoniser les stratégies d'observations entre les laboratoires, de mettre en œuvre des moyens de mesures modernes et automatisés pour une observation couplée océan-atmosphère, ainsi que d'augmenter significativement le flot de données en temps réel afin de mieux contraindre les modèles climat-océan et ceux liés à l'océanographie opérationnelle.

Enfin, avec l'aide des modèles, MOOSE doit apporter les données indispensables à l'établissement de scénarios « du futur » qui permettront d'explorer l'évolution de la Méditerranée en réponse au changement climatique et aux pressions anthropiques, et donc de proposer des adaptations. •••

* Le programme d'observation MOOSE *(Mediterranean ocean observing system on environment)*, labellisé SOERE (« Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche sur l'Environnement ») en 2010, doit permettre de répondre aux demandes sociétales actuelles sur les contaminants et la biodiversité.

Rôle des formations d'eau dense hivernale dans l'évolution spatio-temporelle du fonctionnement de l'écosystème pélagique sous l'influence du changement climatique

Le changement climatique pourrait provoquer une augmentation de la stratification des eaux de surface en mer Méditerranée, une acidification et une oligotrophisation progressives mais rapides et importantes à l'échelle biologique, avec des impacts majeurs sur les organismes planctoniques marins. Il est impératif d'identifier les processus clés qui influencent les changements de régime hydrologique et de fonctionnement des écosystèmes marins. Dans ce sens, le processus de formation des eaux denses (qui ventile les eaux profondes tout en exportant efficacement la matière organique vers les profondeurs et qui contribue significativement à la recharge en sels nutritifs des eaux de surface) pourrait être altéré de manière non négligeable. Un étroit couplage entre l'expérimentation et la modélisation est nécessaire pour aborder la complexité de ces processus et leurs conséquences sur les organismes marins.

Une telle approche a été mise en place dans le cadre du programme MermEX, dont un volet traite de l'impact des changements hydrodynamiques sur les budgets biogéochimiques en Méditerranée et qui implique, entre autres, les UMR LOMIC et CEFREM.

Une série de campagnes en mer « DeWEX 2013 » a été conduite en Méditerranée Nord-occidentale. Un premier leg (février 2013) a permis de prospecter un réseau de stations disposées en étoile autour de la zone de formation des eaux denses (42°N-5°E), cela en hiver, durant la phase de plongée des eaux denses. Un deuxième leg (avril 2013) a permis d'échantillonner le bloom printanier et de suivre la propagation des eaux denses formées pendant l'hiver. Ces campagnes étaient intégrées dans un vaste plan d'implémentation au cours de l'hiver 2012-2013. Des campagnes océanographiques plus légères ont échantillonné la phase automnale de pré-conditionnement des eaux denses, puis la phase estivale stratifiée. Un intense réseau d'observation par plateformes autonomes ainsi que l'imagerie satellitale sont venus compléter cette phase d'observation. Un effort important de modélisation a été fait d'abord pour la coordination, puis pour le lien entre ces opérations, et enfin pour l'exploitation des données.

Cette opération, soutenue par le programme MISTRALS *(Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales)*, a fédéré l'action de plus d'une centaine de scientifiques rattachés à des laboratoires français tels que les UMR LOMIC, CEFREM, MIO, LA, LOCEAN, LOV, *etc.*[*] Elle a également reçu un soutien financier de programmes européens (PERSEUS, GROOM, JERICO[**]) et nationaux (EQUIPEX-NAOS et ANR ASICS-MED[***]) notamment en ce qui concerne les plateformes autonomes et la modélisation.

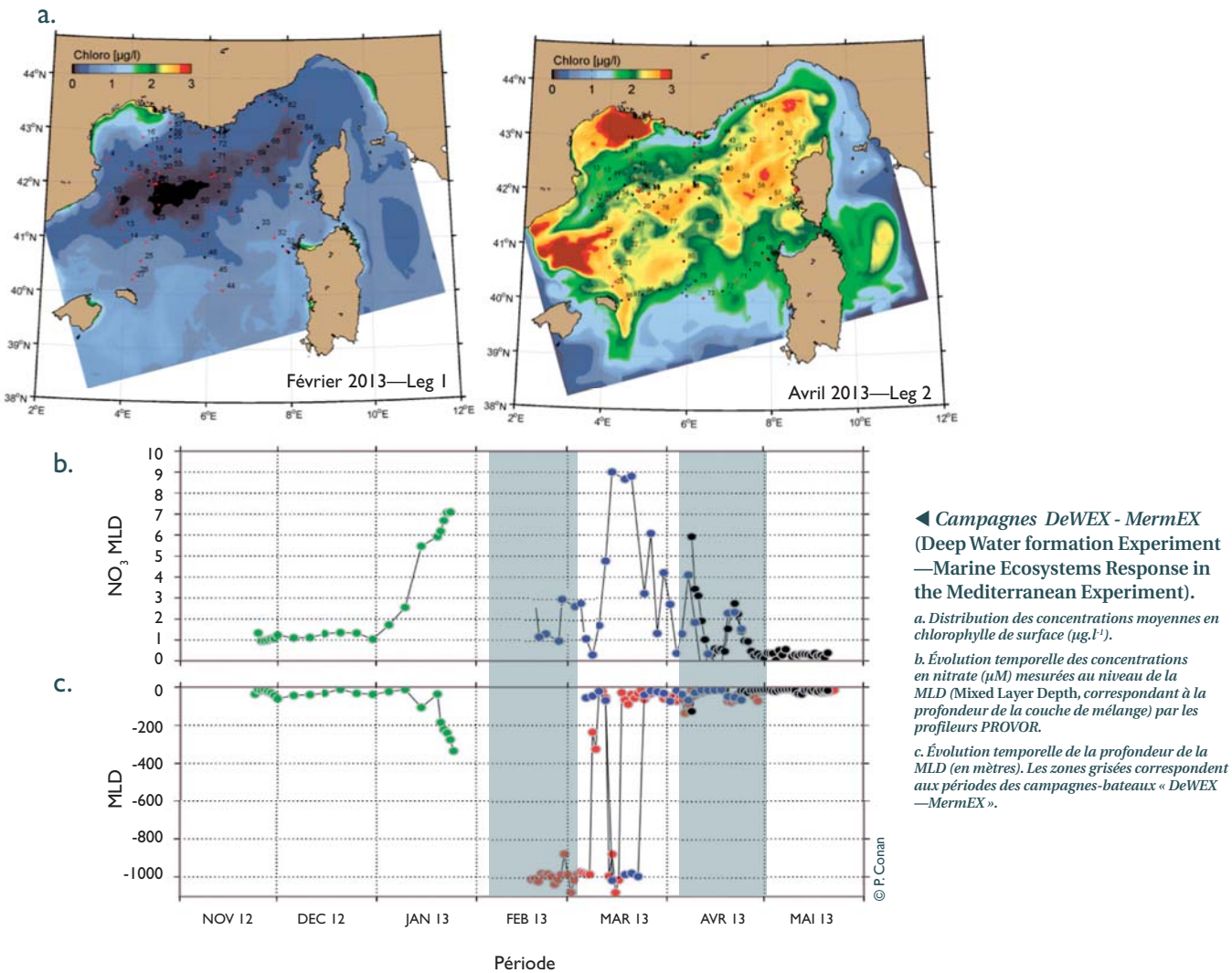
Contact : Pascal Conan, pascal.conan@obs-banyuls.fr

Pour plus d'informations : www.insu.cnrs.fr/environnement/dewex-impacts-of-deep-water-formation-on-mediterranean-pelagic-ecosystems-mermex

* MIO : Institut Méditerranéen d'Océanologie ; LA : Laboratoire d'Aérologie ; LOCEAN : Laboratoire d'océanographie et du climat - Expérimentation et approches numériques ; LOV : Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer.

** PERSEUS : *Policy-oriented marine Environmental Research for the Southern European Seas* ; GROOM : *Gliders for Research, Ocean Observation and Management* ; JERICO : *Joint European Research Infrastructure for Coastal Observatories.*

*** EQUIPEX : Équipements d'Excellence ; NAOS : *Novel Argo Ocean observing System* ; ASICS-MED : *Air-Sea Interaction and Coupling with Submesoscale structures in the MEDiterranean.*



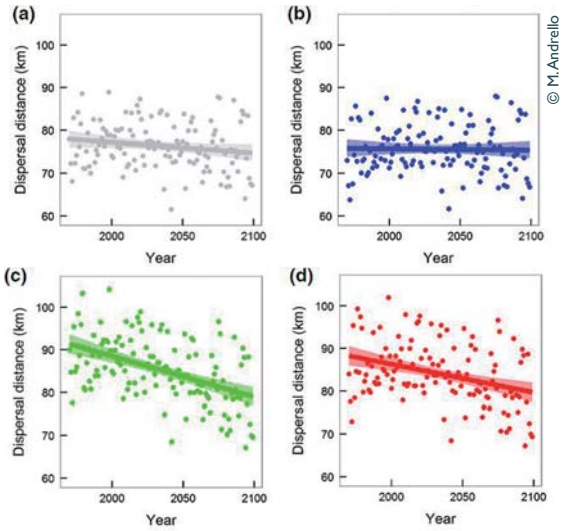
◀ ***Campagnes DeWEX - MermEX*** **(Deep Water formation Experiment —Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment).**

a. Distribution des concentrations moyennes en chlorophylle de surface (µg.l^{-1}).

b. Évolution temporelle des concentrations en nitrate (µM) mesurées au niveau de la MLD (*Mixed Layer Depth, *correspondant à la profondeur de la couche de mélange) par les profileurs PROVOR.

c. Évolution temporelle de la profondeur de la MLD (en mètres). Les zones grisées correspondent aux périodes des campagnes-bateaux « DeWEX —MermEX ».

Le changement climatique va diminuer la capacité des aires marines protégées à essaimer des larves de poissons vers les zones exploitées



© M. Andrello

▲ *Les effets de différents processus sur la distance de dispersion larvaire au cours du siècle.*

En gris (a), effets des seuls changements de vitesse et de direction de courants marins (changements hydrodynamiques) ; en bleu (b), effets des changements hydrodynamiques et du changement de la saison de reproduction des adultes ; en vert (c), effets des changements hydrodynamiques et du changement de la durée de vie larvaire ; en rouge (d), les trois effets combinés.

La mer Méditerranée compte plus d'une centaine d'aires marines protégées (AMP) qui doivent assurer le maintien des espèces exploitées sur l'ensemble du plateau continental. La connectivité des populations, garantie notamment par la dispersion des larves en fonction des courants, est un élément essentiel de l'efficacité du réseau d'AMP car vecteur d'essaimage vers les zones exploitées.

Dans une étude publiée dans la revue *Diversity and Distribution* et financée par la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité et par la Fondation TOTAL, des chercheurs de l'UMR MARBEC associés à d'autres partenaires (IRD, Aix-Marseille Université, UM, CNRS, Météo-France) ont montré que le changement climatique (+ 2,8°C à la fin du 21e siècle) affecterait le degré de connectivité des populations de poissons en Méditerranée. En particulier, la distance de dispersion des larves devrait diminuer de 10 % (ce qui équivaut à 9 km en moyenne), provoquant une réduction de 3 % (soit environ 27 000 hectares) des surfaces exploitées qui seront essaimées par le réseau d'AMP. En effet, l'augmentation de température diminue la durée de vie larvaire — et donc les distances parcourues au gré des courants — alors que les modifications de courantologie attendues en mer Méditerranée vont affecter les trajectoires de ces larves. Ce travail démontre les impacts conjugués, physiques et biologiques, liés au changement climatique sur l'efficacité des réseaux d'AMP.

Contact : David Mouillot, mouillot@univ-montp2.fr

Les structures principales

UMR LOMIC
Laboratoire d'Océanographie Microbienne
(UPMC/CNRS)
12 scientifiques

UMR MARBEC
Marine Biodiversity, Exploitation and Conservation
(IRD/Ifremer/UM/CNRS)
121 scientifiques

UMS MEDIMEER
Centre d'écologie marine expérimentale de l'OSU OREME
(UM/CNRS/IRD)
2 scientifiques

USR LBBM
Laboratoire de Biodiversité et Biotechnologies Microbiennes
(UPMC/CNRS)
20 scientifiques

Concilier exploitation et conservation des écosystèmes marins

L'**UMR *« Biodiversité marine, exploitation et conservation »* (MARBEC – IRD, Ifremer, UM, CNRS)** étudie la biodiversité marine des écosystèmes lagunaires, côtiers et hauturiers à différents niveaux d'intégration, depuis les aspects moléculaires, individuels, populationnels et communautaires, jusqu'aux usages de cette biodiversité par l'homme.

Présente sur trois sites en France métropolitaine (Sète, Montpellier, Palavas-les-Flots) ainsi que dans l'océan Indien, en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud, l'UMR concentre ses efforts sur trois objectifs principaux :

- décrire la biodiversité marine, comprendre sa dynamique et le fonctionnement des écosystèmes marins ;
- analyser l'impact des pressions anthropiques sur ces écosystèmes et développer des scénarios de réponses aux changements globaux ;
- mieux concilier l'exploitation et la conservation de ces écosystèmes.

Pour aborder ces défis, l'unité s'est structurée en huit thèmes de recherche :

❶ écologie évolutive et adaptation ;
❷ individus, populations et habitats ;
❸ dynamique et fonctionnement des communautés ;
❹ microorganismes et interactions avec les macroorganismes ;
❺ contaminants : devenir et réponses ;
❻ aquacultures durables ;
❼ systèmes littoraux d'usages multiples ;
❽ approche écosystémique des pêches.

L'étude des impacts des changements globaux sur la biodiversité marine est présente dans chacun de ces thèmes.

Vulnérabilité et préservation des écosystèmes méditerranéens marins, littoraux et de grande profondeur

Les recherches du « ***Laboratoire d'Écogéochimie des Environnements Benthiques*** » **(UMR LECOB – UPMC, CNRS)** s'intéressent aux fonctions et à la vulnérabilité des écosystèmes des fonds marins et de leurs interfaces.

Du littoral méditerranéen aux grandes profondeurs, les modèles étudiés par l'institut sont des environnements fortement dynamiques et soumis à des pressions anthropiques multiples : habitats rocheux, embouchures de fleuves, canyons sous-marins, sources hydrothermales. Ces habitats sensibles sont aussi des *hot-spots* de biodiversité et de productivité qui font l'objet de mesures de conservation.

Les recherches du LECOB visent à :

- mieux comprendre les réseaux d'interactions dynamiques qui lient les communautés benthiques marines et leurs fonctions aux propriétés de l'environnement ;
- modéliser ces interactions pour prédire les relations entre diversité biologique, hétérogénéité de la ressource et fragmentation de l'habitat au travers d'approches métapopulations et métacommunautés ;
- intégrer ces connaissances dans des modèles prédictifs basés sur des scénarios climatiques ou de perturbations anthropiques directes ;
- mettre au point et évaluer des méthodes et outils permettant de tester l'efficacité de mesures de conservation ou la pertinence d'indicateurs de la qualité écologique du milieu.

En plus du soutien de ses organismes de tutelle, le LECOB bénéficie pour ses projets en cours de ceux de l'ANR, du programme LITEAU du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) et de la Fondation d'entreprise TOTAL. •••

Influences hydrodynamiques sur la conservation des coraux en contexte littoral et dans les canyons profonds

Les gorgonaires sont des espèces-ingénieures remarquables du littoral méditerranéen. Ils jouent un rôle essentiel pour la biomasse et la diversité des substrats rocheux. Pour évaluer l'impact de mesures de protection sur la distribution de ces espèces, le LECOB développe des modèles de connectivité, en simulant de la dispersion larvaire, qui combinent des études expérimentales du comportement de mobilité des larves et des simulations numériques de l'hydrodynamique. Ces estimations de la connectivité sont établies pour des métapopulations de différentes espèces de gorgonaires (dont le corail et les gorgones rouges et blanches), en mer Ligure dans le cadre d'une bourse doctorale européenne (MARES*) et dans le Golfe du Lion dans le cadre d'un projet LITEAU IV (RocConnect**).

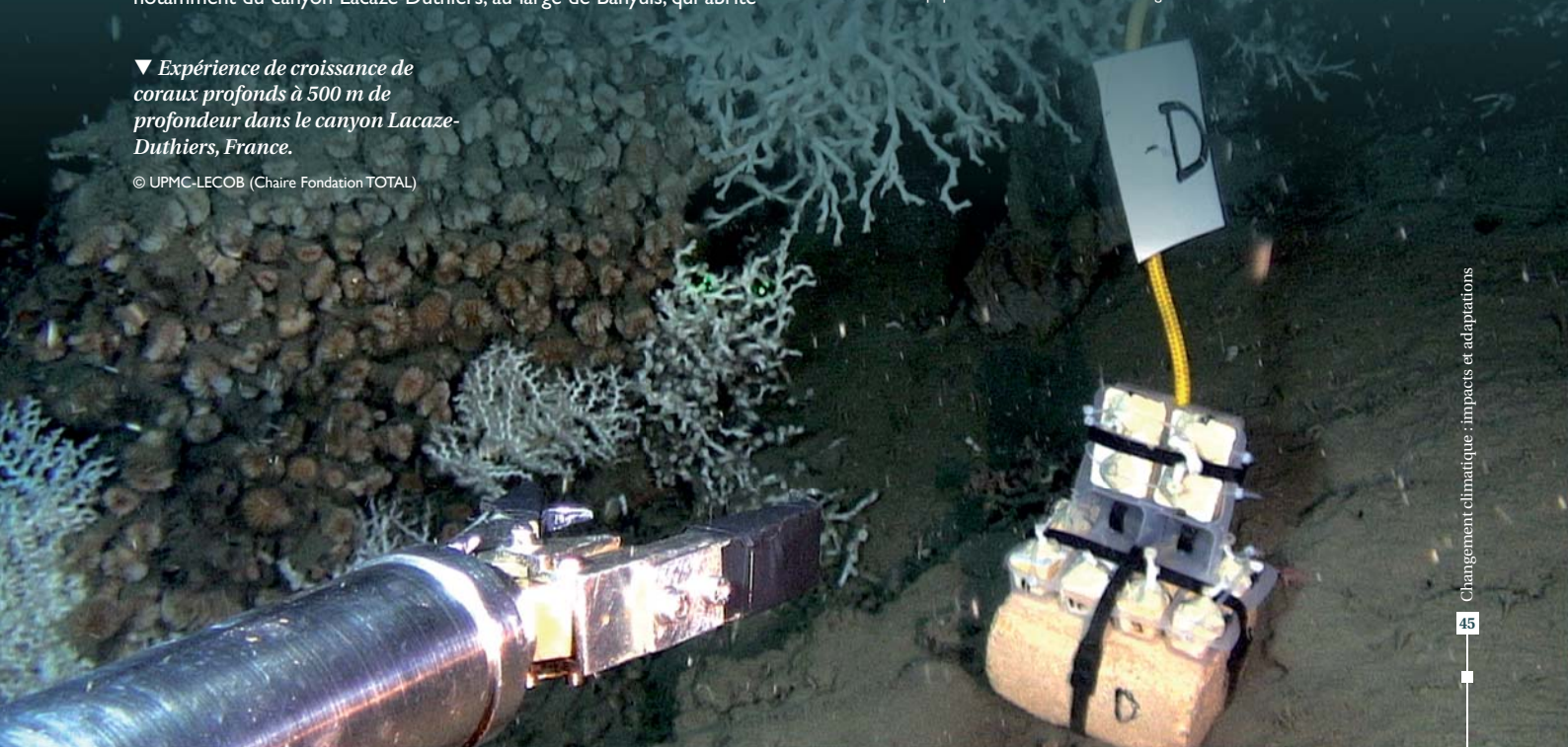
Les coraux scléractiniaires jouent un rôle comparable en environnement profond. Particulièrement vulnérables aux impacts anthropiques (chalutage, déchets) et aux effets du changement global (réchauffement, acidification et modification de la circulation des masses d'eau), ils font également l'objet de mesures de protection au niveau international. Les ressources nutritives de certains canyons sous-marins, liées à des conditions hydrodynamiques particulières, en font des habitats privilégiés pour ces coraux. C'est le cas notamment du canyon Lacaze-Duthiers, au large de Banyuls, qui abrite d'importantes populations de *Lophelia pertusa* et de *Madrepora oculata*, désormais intégrées dans le plan de gestion du Parc naturel marin du Golfe du Lion.

Afin d'évaluer la sensibilité de ces écosystèmes profonds aux changements climatiques, et notamment à l'influence d'évènements météorologiques extrêmes, le LECOB a développé un programme de recherche dédié à la croissance et au rôle écologique de ces espèces-ingénieures, associant géochimie organique et écologie microbienne. Ces travaux s'inscrivent dans le programme de la chaire « Environnement marin extrême, biodiversité et changement global » mise en place par l'UPMC avec le soutien de la Fondation TOTAL. Ils ont été appuyés par le CNRS (Projet Exploratoire Pluridisciplinaire de l'Institut d'Écologie et Environnement) et font l'objet d'une collaboration avec la *Jacobs International University* de Brême (Allemagne).

Contacts : Katell Guizien, katell.guizien@obs-banyuls.fr
Franck Lartaud, franck.lartaud@obs-banyuls.fr
& Nadine Le Bris, lebris@obs-banyuls

* *Marine Ecosystem Health and Conservation.*

** Connectivité des populations de l'habitat rocheux fragmenté du Golfe du Lion.



▼ ***Expérience de croissance de coraux profonds à 500 m de profondeur dans le canyon Lacaze-Duthiers, France.***

© UPMC-LECOB (Chaire Fondation TOTAL)

Étude comparée de modèles d'organismes marins classiques et non conventionnels

La recherche menée par **l'UMR « *Biologie Intégrative des Organismes Marins* » (BIOM – UPMC, CNRS)** est essentiellement académique. Son projet scientifique est focalisé sur l'étude des mécanismes de développement et d'adaptation des organismes à travers une approche évolutive. Cet objectif est commun à de nombreux groupes de recherche, mais l'originalité de ce projet réside dans son utilisation de modèles d'organismes marins non conventionnels, dans le cadre d'études comparatives et complémentaires avec celles menées sur des organismes modèles plus établis et plus traditionnels.

L'approche utilise les deux concepts opposés mais complémentaires de la vie — la grande diversité du vivant et son unité fondamentale, la cellule — ce qui permet de réaliser des comparaisons pertinentes entre des organismes pourtant phylogénétiquement éloignés. Ce type d'approche a souvent permis d'accomplir, dans des domaines biologiques variés, une percée significative conduisant à trouver des réponses à certaines questions biologiques fondamentales.

Le projet global de BIOM s'inscrit dans la lignée traditionnelle de ceux des stations marines : il consiste en l'étude de la biologie des organismes marins, à la fois pour explorer leur fantastique diversité (19 phylums métazoaires sur 36 sont exclusivement marins) et pour utiliser et étudier cette diversité en tant que modèles biologiques potentiels, en complémentarité avec les modèles conventionnels.
Dans ce contexte global, les deux principaux axes de recherche de BIOM sont la biologie du développement et l'étude des mécanismes d'adaptation, en utilisant à la fois les organismes modèles unicellulaires et multicellulaires.

L'intérêt de l'unité BIOM pour l'adaptation aux changements climatiques peut être illustré par l'exemple du projet SalTemp. Plus globalement, les études menées au sein de l'unité sur l'adaptation des organismes marins aux changements environnementaux incluent les changements climatiques.

Projet SalTemp : réchauffement global et adaptation à la migration chez le saumon Atlantique de rivière longue, l'axe Loire-Allier

M. Caunt © Shutterstock

La température intervient avec les cycles de lumière/obscurité pour contrôler le déclenchement de la migration du saumon vers la mer. Mais comment ? Comment capte-t-il l'information « température » et quels messages hormonaux élabore-t-il en réponse ? Par ailleurs, s'adaptera-t-il au réchauffement climatique en cours ?

À toutes ces questions, le projet SalTemp, coordonné par l'équipe « Facteurs du Milieu et Mécanismes Adaptatifs » de l'UMR BIOM, ambitionne de trouver des réponses. L'objectif est de comprendre comment lumière et température interagissent pour contrôler le déclenchement de la migration du saumon. Cette information est en effet cruciale pour sa survie, laquelle dépend des températures que le poisson rencontre sur son parcours. C'est pourquoi les conséquences du réchauffement climatique sur ces processus seront également étudiées.

La température est un effecteur majeur du métabolisme, de la physiologie et du comportement des poissons. Chacun possède sa fenêtre physiologique au-delà de laquelle — températures trop basses ou trop élevées — la survie est compromise.

Il s'agit dans ce projet d'étudier chez le saumon du bassin Loire/Allier :

- les mécanismes de la thermoréception ;
- l'impact de cette thermoréception sur la production rythmique (journalière et saisonnière) de la mélatonine ;
- le rôle de la mélatonine sur les sécrétions hormonales hypophysaires qui interviennent dans le déclenchement de la migration vers l'océan.

L'équipe étudie *in vivo* et *in vitro* comment photopériode et température interagissent dans le contrôle du rythme de production de la mélatonine (hormone « donneuse de temps ») et dans celui de l'axe neuroendocrine hypothalamo-hypophysaire impliqué dans le contrôle de la migration vers l'océan. Une autre hypothèse sera également testée, selon laquelle tout ou partie des effets de la température passe par des canaux membranaires perméables au calcium agissant au niveau de l'organe pinéal et de l'axe neuroendocrine.

Une expérimentation sera mise en œuvre pour étudier l'impact d'un réchauffement de 5°C sur l'activité locomotrice et le comportement de dévalaison, mais aussi sur les mécanismes moléculaires, endocriniens et physiologiques qui les contrôlent. L'ensemble des résultats permettra de comprendre et de prédire l'impact de l'élévation de température et de son décalage avec la photopériode sur la migration. Les conséquences sur la survie de la population et la durabilité des actions de repeuplements seront également examinées.

Contact : Jack Falcón, falcon@obs-banyuls.fr

Effets du réchauffement climatique sur le déclenchement des blooms phytoplanctoniques marins : photopériodisme, composition et adaptation

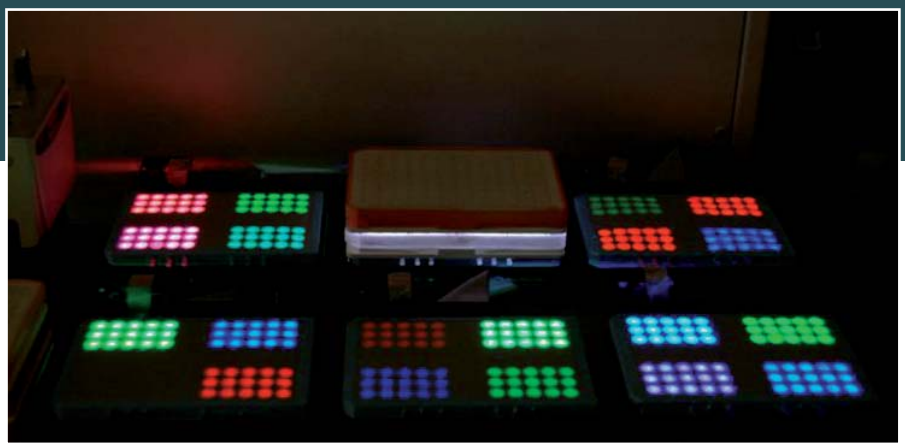
Le réchauffement des océans est le principal facteur responsable des changements globaux de productivité, biomasse et phénologie (moment des blooms) des communautés phytoplanctoniques. Dans les océans tempérés, l'abondance et la diversité du phytoplancton augmentent de façon considérable entre l'hiver et le printemps. Ces blooms résultent vraisemblablement d'une combinaison de paramètres physiques (lumière, température), chimiques (nutriments) et écologiques (interactions avec les bactéries, prédation). La vie de la plupart des organismes vivants est régie par le cycle jour/nuit (photopériode) qui régule des processus saisonniers (photopériodisme). La température est un facteur important contrôlant la physiologie du phytoplancton ; la photopériode est, elle, susceptible de contrôler le moment des blooms.

Dans le cadre du projet PHOTO-PHYTO (ANR 2014-2017) des chercheurs du LOMIC, de l'UMR MARBEC et de l'OOB, en partenariat avec l'entreprise Metabolium de Romainville, étudient le rôle et la hiérarchie de facteurs environnementaux fluctuants (comme la température) et intrinsèques (comme l'horloge circadienne contrôlant le photopériodisme) dans l'initiation des blooms printaniers. Ce projet propose de développer une approche pluridisciplinaire combinant des expertises uniques en océanographie, écologie microbienne, génomique fonctionnelle et évolution expérimentale sur la picoalgue modèle *Ostreococcus tauri.*

Les questions explorées sont les suivantes :

1. Quels sont les principaux facteurs *in situ* contrôlant les blooms phytoplanctoniques printaniers ?
2. Comment la température et la photopériode interagissent-elles pour déclencher les blooms printaniers ?
3. L'adaptation au réchauffement affecte-t-elle le photopériodisme et les interactions trophiques ?
4. Quel est l'effet du réchauffement sur les communautés microbiennes naturelles ?

Contact :
François-Yves Bouget, francois-yves.bouget@obs-banyuls.fr



◀ ***Simulateur de lumière en microplaques permettant de reproduire de multiples conditions d'intensité, de qualité et de photopériode lors de la culture d'espèces phytoplanctoniques.***

Ce dispositif permet également de mesurer l'expression de paramètres de luminescence pour suivre l'impact des paramètres environnementaux (lumière, nutriments) et anthropiques (polluants) sur l'expression de gènes rapporteurs.

Adaptation des micro-organismes marins aux changements globaux

L'objectif général du *« **Laboratoire d'Océanographie Microbienne** »* **(UMR LOMIC – UPMC, CNRS)** est d'étudier les interactions réciproques entre un milieu changeant et varié — l'océan — et les microorganismes qui l'habitent, de manière intégrative, du gène à l'écosystème. Pour cela, le LOMIC rassemble des compétences dans les domaines de la biogéochimie marine, de l'écologie microbienne, de la génomique fonctionnelle et de l'écotoxicologie. Cette pluridisciplinarité permet d'aborder des questions aux frontières de la science.

La recherche au sein du LOMIC est structurée autour de quatre axes thématiques :

- la régulation des fonctions microbiennes par la lumière et les nutriments ;
- la réactivité de la matière organique et la diversité microbienne ;
- les processus microbiens et la biogéochimie des océans ;
- l'écotoxicologie et l'ingénierie métabolique microbienne.

Ces thématiques concernent à la fois des questions de recherche fondamentale (réponses des microorganismes aux changements globaux des océans, par exemple) et de recherche appliquée (valorisation des microalgues, biodégradation de plastiques...) qui sont élaborées en partenariat avec des industriels (Mycrophyt, Metabolium, *etc.*).

Les approches mises en place au LOMIC sont diversifiées, allant d'expériences sur des microorganismes modèles (par exemple *Ostreococcus tauri* ou *Photobacterium angustum*) jusqu'à des études de terrain lors de campagnes océanographiques, en passant par des expériences sur des communautés microbiennes en conditions contrôlées.

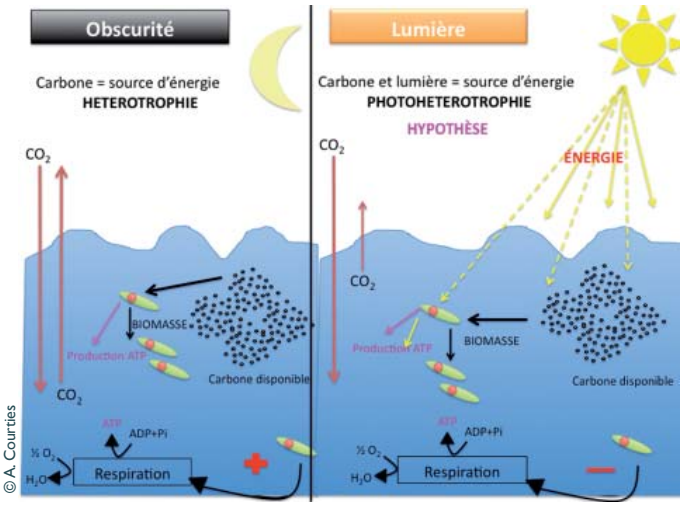
Le LOMIC s'intéresse, entre autres, à l'étude de la réponse et de l'adaptation des microorganismes marins autotrophes et hétérotrophes aux changements climatiques. C'est une question clé pour analyser les conséquences des modifications environnementales à l'échelle planétaire. Ces microorganismes sont en effet essentiels à la vie sur terre, et leurs métabolismes très diversifiés leur permettent de réaliser de multiples étapes dans les cycles biogéochimiques.

Le LOMIC est rattaché à l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS, mais est aussi thématiquement en interaction forte avec l'Institut d'Écologie et de l'Environnement et l'Institut des Sciences Biologiques du CNRS. Il est par ailleurs impliqué dans différents projets de recherche en mer Méditerranée et dans les océans Austral, Arctique et Pacifique. •••

Comprendre les déterminants de l'activité et la diversité des microorganismes dans les environnements aquatiques

Les activités du « ***Laboratoire de Biodiversité et Biotechnologies Microbiennes*** » **(USR LBBM – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS)** portent sur la connaissance de la biodiversité et du rôle fonctionnel des microorganismes dans l'environnement en se focalisant sur les systèmes aquatiques (marins, maritimes, continentaux). Pour cela, le LBBM fédère des compétences en écologie microbienne, en microbiologie, en écologie chimique, en biotechnologie et en pharmacologie exploratoire.

L'objectif de l'unité est de mieux comprendre comment les facteurs biotiques et abiotiques régulent l'activité et la diversité des microorganismes dans les environnements aquatiques. Une part importante de son activité est également dédiée à la valorisation des connaissances issues de ces recherches (potentiel biotechnologique de sa collection de microorganismes, développement d'outils de diagnostic).



◀ ***Modes de vie hétérotrophe et photohétérotrophe.***
À gauche, le carbone organique est transformé en biomasse cellulaire ou utilisé pour produire de l'énergie cellulaire via la respiration.
À droite, pour un nombre équivalent de cellules, la respiration est en théorie moins nécessaire et la production de dioxyde de carbone réduite.

Les missions du LBBM sont de :
- développer, dans le domaine de l'écologie microbienne des milieux aquatiques, une recherche de pointe s'appuyant sur l'étude de la diversité des microorganismes, sur la connaissance de leurs propriétés génétiques et physiologiques, et sur celle des molécules qui leur permettent d'interagir ou d'agir sur leur environnement ;
- soutenir et promouvoir l'innovation scientifique à l'interface santé-environnement par des actions collaboratives permettant de répondre aux grands défis sociétaux (traitement des cancers, impact et devenir des contaminants chimiques et biologiques dans l'environnement, compréhension des possibles effets du changement climatique sur les microorganismes) ;
- transmettre les connaissances au travers de la formation des étudiants et de jeunes chercheurs.

La recherche au sein du LBBM est organisée en trois thématiques majeures : « Omique environnementale et mécanismes de régulation des communautés naturelles », « Biodiversité microbienne et biomolécules » et « Contaminants émergents dans les environnements aquatiques et santé ».

Affiner les prévisions climatiques à long terme, grâce à l'étude des effets de la lumière sur les bactéries à protéorhodopsine des océans

▲ ***Photobioréacteurs utilisés dans le cadre du projet ANR RHOMEO pour des mesures de rendement en carbone dans différentes conditions d'éclairement.***

Le LBBM coordonne le projet RHOMEO *(ProteoRHOdopsin-containing prokaryotes in Marine EnvirOnments)*, en collaboration avec l'UMR « Adaptation et Diversité en Milieu Marin » de la station biologique de Roscoff. L'objectif de ce projet est de combiner l'estimation de la diversité et de la dynamique spatio-temporelle des bactéries photohétérotrophes marines avec des études physiologiques en photobioréacteurs ciblant des souches isolées.

Des techniques moléculaires de pointe sont mobilisées pour déterminer la diversité des bactéries contenant des protéorhodopsines (à l'aide de pompes à protons lumino-dépendantes permettant d'utiliser la lumière comme source d'énergie) dans trois sites contrastés : en mer Méditerranée, dans la Manche et dans l'océan Arctique. Les études physiologiques utilisent des photobioréacteurs ainsi que des souches microbiennes modèles pour évaluer les effets de la lumière sur le rendement de croissance de ces organismes dans différentes conditions de lumière et de qualité de substrats.

Ces expérimentations conduiront à déterminer la quantité de carbone produite grâce à l'utilisation de l'énergie lumineuse chez les photohétérotrophes. Ces résultats permettront de lier l'utilisation de sources de carbone spécifiques et la physiologie de souches modèles représentatives de l'environnement. La combinaison des expérimentations *in situ* et des expérimentations physiologiques permettra d'estimer les effets de la lumière sur le métabolisme de ces organismes aux sites échantillonnés. Ces résultats contribueront à affiner la compréhension des prévisions climatiques à long terme, en tenant compte de ces organismes qui constituent une composante très importante des communautés microbiennes des océans.

Contact : Marcelino Suzuki, suzuki@obs-banyuls.fr

Pour plus d'informations : www.obs-banyuls.fr/rhomeo

▲ *Mésocosmes* **in situ** *de MEDIMEER immergés dans la lagune de Thau (Méditerranée Nord-occidentale, France).*
Le volume d'eau de chaque mésocosme est de 2 m³ et leur profondeur de 2 m.

© B. Mostajir

Expérimentations en conditions contrôlées en milieux marins

Le « ***Centre d'écologie marine expérimentale*** » (**plateforme MEDIMEER de l'OSU OREME – CNRS, UM, IRD**), basé à la Station Méditerranéenne de l'Environnement Littoral à Sète, propose à la communauté scientifique nationale et internationale une expertise scientifique de pointe dans la réalisation d'expérimentations en conditions contrôlées (mésocosme) en milieux marins.

Un « mésocosme » est une enceinte expérimentale, isolant un volume d'eau supérieur à 1 m³ avec des conditions proches du milieu naturel, dans laquelle les facteurs environnementaux (température, lumière, CO_2, éléments nutritifs, *etc.*) peuvent être manipulés de façon réaliste. C'est un outil puissant faisant le lien entre l'observation du milieu et les études en laboratoire à petite échelle.
Les objectifs de MEDIMEER sont d'offrir aux groupes de recherche nationaux et internationaux à la fois :

- une expertise dans le domaine de l'écologie marine expérimentale axée sur l'expérimentation en mésocosme ;
- et une large gamme de facilités expérimentales. MEDIMEER possède des mésocosmes *in situ* immergés dans la lagune de Thau (mais pouvant être transportés et déployés sur d'autres sites), des mésocosmes à terre en attente d'installation, ainsi que trois plateformes (observation, analyse et logistique) et un parc instrumental. Cet ensemble d'infrastructures permet d'étudier, en conditions contrôlées, l'impact de forçages naturels et anthropiques sur le fonctionnement des écosystèmes marins (production, diversité, flux de matière, résistance, résilience, *etc.*).

MEDIMEER apporte également un soutien à des activités de recherche plus appliquées comme la gestion durable des ressources, la remédiation des écosystèmes dégradés, la production de biomasse à des fins industrielles (biocarburant, bioénergie), et l'écotoxicologie (dans les mésocosmes à terre).

Les recherches effectuées à MEDIMEER permettront de quantifier et de qualifier les effets de forçages physiques, chimiques et biologiques locaux et globaux sur la diversité des organismes aquatiques, sur leurs physiologies et leurs interactions et, enfin, sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. •••

© UPMC - OOB

EMBRC, l'un des plus grands dispositifs européens de recherche sur la biodiversité

Les trois stations marines de Banyuls-sur-Mer, Roscoff et Villefranche-sur-Mer, placées sous la co-tutelle de l'**UPMC** et du **CNRS**, ont uni leurs forces au sein du ***« Centre national de ressources biologiques marines »*** (**EMBRC-France**) dans l'objectif d'approfondir la connaissance de la biodiversité marine.

Les ressources biologiques marines et leurs applications potentielles à des domaines aussi variés que l'agriculture, la santé ou la cosmétique, restent en effet encore peu explorées. Or, avec 11 millions de kilomètres carrés, la France possède la deuxième zone économique exclusive (ZEE) au monde et, répartie sous tous les climats, cette ZEE offre une biodiversité d'une richesse considérable.

Point d'entrée de l'exploration des bio-ressources marines sur le territoire, EMBRC-France bénéficie dans sa gouvernance du soutien du programme « Investissements d'avenir », de l'implication forte des régions Bretagne, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur, ainsi que de celle des pôles de compétitivité « Mer Bretagne Atlantique » et « Mer Méditerranée ».

- Dans un contexte régional et national, EMBRC-France et plus particulièrement l'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer (OOB), offre aux entreprises et aux scientifiques académiques un accès simplifié aux écosystèmes, ressources biologiques marines et à des plateformes scientifiques de pointe. Par l'accueil sur place ou les prestations à distance, EMBRC-France lève ainsi le verrou du difficile accès aux ressources biologiques marines et met à disposition un outil majeur pour l'exploration et l'exploitation de la biodiversité marine, de l'échelle moléculaire aux écosystèmes.
- Dans un contexte plus large, l'EMBRC a été sélectionné en 2009 par le Forum stratégique européen pour les infrastructures de recherche (ESFRI) pour devenir l'un des futurs grands dispositifs européens de recherche. Avec une mise en œuvre prévue pour 2016, ce centre européen de ressources biologiques marines reliera les principales stations de biologie marine européennes et il en sera bientôt l'un des leviers pour l'innovation. ■

▲ *À bord du navire de station « Nereis II » : chercheurs posant une ligne verticale de trappes afin de piéger les particules qui sédimentent.*

© P. Lebaron

▲ *Larves à ptérothèques du puceron* **Aphis gossypii.**
© J.P. Deguine

Changement climatique *& interactions entre organismes*

Les changements climatiques modifient en premier lieu les facteurs abiotiques de l'environnement dans lesquels évoluent les organismes vivants : lumière, température, humidité du sol et de l'air, composition chimique de l'eau, pression atmosphérique et hydrostatique, structure physique et chimique du substrat. Ces changements peuvent avoir des répercussions importantes sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes, notamment en modifiant la biologie ou le comportement des organismes (plantes, animaux, microorganismes) et ainsi conduire à des variations importantes au sein des interactions qu'ils établissent entre eux (compétition, prédation, parasitisme, mutualisme, vection…).

Face à ces modifications profondes, la communauté scientifique doit pouvoir répondre à trois enjeux principaux. Le premier enjeu concerne la connaissance académique de l'impact des changements climatiques sur la biologie, la distribution ou l'abondance des organismes, ce qui commence à être assez bien décrit, mais également l'impact de ces changements sur les interactions entre organismes et les conséquences sur la dynamique des chaines trophiques, paramètres assez mal maitrisés aujourd'hui ***(enjeu 1).*** Le second enjeu consiste à prédire les risques agronomiques et sanitaires, en particulier par des approches de modélisation ***(enjeu 2).*** Enfin, adapter les pratiques ou en proposer de nouvelles tant du point de vue cultural, sanitaire, politique et social, est un enjeu majeur pour limiter les « dommages » ***(enjeu 3).***

Les unités de recherche membres d'Agropolis International travaillent sur un très large éventail d'interactions entre organismes (interactions biotiques). Ces interactions peuvent mettre en relation deux ou plusieurs macroorganismes (plantes, insectes, mollusques, nématodes, mammifères), ou un macroorganisme avec des microorganismes (bactéries, virus, champignons). Les grands types d'interactions biotiques principalement travaillés sont la symbiose, la pathogénie, le parasitisme et la vectorisation. Ces interactions biotiques concernent des plantes d'intérêt agronomique et des animaux, des auxiliaires ou des ravageurs, et les études menées s'attachent aussi bien au milieu terrestre qu'aquatique.

Pour décrypter les causes et les conséquences des impacts du changement climatique, la connaissance fondamentale des mécanismes d'interactions biotiques des différents modèles d'intérêt est mobilisée ***(enjeu 1).*** Par exemple, de nombreuses espèces terrestres, d'eau douce et marines, modifient leurs aires de répartition (cas du virus de la panachure jaune du riz en Afrique et de la chenille processionnaire du pin) ou leurs activités saisonnières (cas de *Mycobacterium ulcerans*, agent de l'ulcère de Buruli). Des agents pathogènes s'adaptent également aux modifications des comportements de leurs organismes vecteurs (cas de la ré-émergence de la schistosomose).

De nombreuses UMR sont impliquées dans la modélisation des conséquences des changements climatiques ***(enjeu 2)***. Cela peut concerner l'étude des processus épidémiologiques de maladies transmises par des macroorganismes vecteurs (dissémination de maladies de plantes par des insectes, évaluation de la transmission de la fièvre catarrhale ovine en Europe, maladies à transmission vectorielle au Maghreb et en Europe). Les données biologiques n'étant pas seules en cause, ces modélisations peuvent également intégrer des données sociétales et juridiques (projet RELAIS sur les risques épidémiologiques en Amazonie).

La communauté scientifique d'Agropolis met en œuvre des recherches finalisées conduisant à proposer de nouvelles pratiques ***(enjeu 3)***. Ces pratiques peuvent être culturales, peuvent concerner le développement de nouveaux auxiliaires de lutte biologique ou peuvent concerner les stratégies politiques et sanitaires.

Les unités de recherche d'Agropolis impliquées dans l'étude des interactions entre les organismes sont localisées sur de nombreux campus montpelliérains (Saint Éloi, La Gaillarde, Baillarguet, Lavalette), mais également régionaux (Inra d'Avignon, Université de Perpignan). Cette spécificité multi-site rend nécessaire l'élaboration d'un certain nombre d'outils partagés et de mise en réseau. Par exemple, le réseau régional « Interactions Microorganismes-Hôtes* », qui regroupe actuellement plus de vingt équipes des sites montpelliérains, nîmois et perpignanais, se structure autour de l'étude des mécanismes des interactions biotiques entre microorganismes (bactéries, virus champignons, parasites) et leurs hôtes (plantes, invertébrés, mammifères). Il a pour but d'assurer la visibilité de la thématique, de créer une animation scientifique et de participer à la structuration de la thématique au niveau de l'enseignement et de la recherche.

Sophie Gaudriault
& Nathalie Volkoff (UMR DGIMI),
Elsa Ballini & Claire Neema (UMR BGPI)

* www.imh.univ-montp2.fr

Changement climatique *& interactions entre organismes*

Les structures principales
Laboratoire européen du CSIRO (CSIRO) *4 scientifiques*
EBCL – Laboratoire européen de lutte biologique de l'USDA/ARS (USDA/ARS) *5 scientifiques*
UMR BGPI Biologie et Génétique des Interactions Plante-Parasite (Inra/Cirad/Montpellier SupAgro) *39 scientifiques*
UMR CBGP Centre de Biologie pour la Gestion des Populations (Inra/Cirad/IRD/Montpellier SupAgro) *52 scientifiques*
UMR CMAEE Contrôle des Maladies Animales Exotiques et Émergentes (Inra/Cirad) *35 scientifiques*
UMR DGIMI Diversité, Génomes et Interactions Microorganismes-Insectes (Inra/UM) *19 scientifiques*
UMR IHPE Interactions Hôtes-Pathogènes-Environnements (UM/UPVD/Ifremer/CNRS) *24 scientifiques*
UMR InterTryp Interactions hôtes-vecteurs-parasites-environnement dans les maladies tropicales négligées dues aux trypanosomatidés (Cirad/IRD) *30 scientifiques*
UMR IPME Interactions Plantes-Microorganismes-Environnement (IRD/Cirad/UM) *49 scientifiques*
UMR LSTM Laboratoire des Symbioses Tropicales & Méditerranéennes (IRD/Cirad/Inra/UM/Montpellier SupAgro) *45 scientifiques*
Suite p. 56

Gestion des populations et des communautés d'espèces à fort enjeu socioéconomique ou écologique

Les recherches du « ***Centre de Biologie pour la Gestion des Populations*** » **(UMR CBGP – Inra, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro)** sont centrées sur la biologie de certaines populations et communautés d'organismes : celles qu'il convient de gérer parce qu'elles représentent un enjeu majeur pour la santé humaine, l'agronomie, la foresterie et la conservation. Les membres du CBGP s'emploient à caractériser la diversité de ces organismes, à en décrire les structures génétiques actuelles et passées, à identifier leurs rôles au sein des interactions dans lesquelles ils sont impliqués (parasitisme, prédation, réservoirs de pathogènes...) ainsi que les facteurs intrinsèques et extrinsèques susceptibles de les modifier. L'un des objectifs de ces recherches est de prédire l'évolution de la biodiversité sous la contrainte des changements globaux, que ceux-ci soient d'origine climatique et/ou anthropique. Ainsi, outre leur intérêt académique, les productions scientifiques de l'unité visent à favoriser le diagnostic, l'aide à la décision et/ou la définition de stratégies de lutte contre des nuisibles ou de conservation d'espèces menacées.

Pour ce faire, l'UMR utilise, voire développe, des concepts et des outils issus de champs disciplinaires aussi variés que ceux de la systématique, de la phylogénétique et de la phylogéographie, de la génétique et de la génomique des populations, de l'étude du phénotype, de l'écologie des communautés, de l'immuno-écologie, de l'épidémiologie, de la modélisation multi-agents et des géostatistiques. Les modèles de prédilection du CBGP sont les insectes (notamment ravageurs des cultures ou auxiliaires de lutte biologique), les nématodes phytoparasites ainsi que les rongeurs, qu'ils soient ravageurs des cultures et des denrées stockées et/ou qu'ils soient réservoirs de pathogènes humains.

Dans le cadre spécifique de l'étude de l'impact des changements climatiques sur la biodiversité, le CBGP s'intéresse à la processionnaire du pin, une chenille invasive dont l'aire de distribution semble évoluer rapidement en Europe à la faveur du réchauffement en cours. Par ailleurs, à une échelle temporelle plus large, des travaux sont également menés sur les conséquences des cycles paléo-climatiques sur la distribution géographique et la structure génétique des populations de divers rongeurs africains et eurasiatiques ou encore sur celles d'insectes de différentes familles *(Noctuidae, Papilionidae, Tenebrionidae)*. Enfin, les activités académiques de l'unité s'accompagnent de nombreuses actions de renforcement des capacités, notamment à destination des étudiants et des personnels des pays du Sud qui sont les plus exposés aux conséquences des changements globaux.

Symbioses végétales : diversité, interactions et adaptation de l'hôte aux contraintes environnementales

Le « ***Laboratoire des Symbioses Tropicales & Méditerranéennes*** » **(UMR LSTM – IRD, Cirad, Inra, UM, Montpellier SupAgro)** met en œuvre des travaux académiques et finalisés de recherche, largement orientés vers les Suds et la formation par la recherche. Il étudie la diversité des symbioses au niveau des mécanismes de l'interaction, mais aussi leurs rôles sur l'adaptation de l'hôte végétal aux contraintes environnementales (nutriments minéraux, stress hydriques et salins, *etc.*) dont l'impact sur la productivité et la stabilité des éco- et agro-systèmes sera vraisemblablement aggravé dans le contexte des scénarios du changement global.

Ces études sont conduites à travers une double approche :
- exploration de la diversité des symbioses tropicales et méditerranéennes ;
- caractérisation de systèmes modèles symbiotiques originaux issus de l'exploration de la biodiversité.

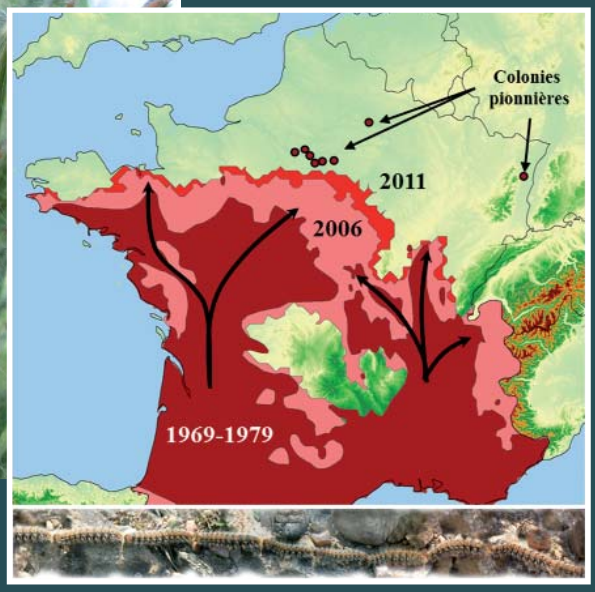
Le LSTM contribue à l'élaboration de stratégies d'ingénierie écologique susceptibles de minimiser l'impact du changement global sur le bio-fonctionnement des éco- et agro-systèmes méditerranéens et tropicaux. L'amélioration de la productivité végétale des écosystèmes peu anthropisés et des agro-écosystèmes, à usages alimentaires et non-alimentaires, ainsi que la restauration des environnements dégradés, sont en effet au centre des finalités des recherches conduites dans l'unité.

Voir un exemple de projet conduit par l'UMR LSTM page 39. •••

© H. Santos

◀ *Chenilles processionnaires du pin sur leur nid d'hiver.*

▼ *Évolution de la distribution de la processionnaire du pin depuis la fin des années 1960.*



© J. Rousselet (Inra Orléans) & J.-C. Martin (Inra Avignon)

Des hivers plus chauds profitent à la processionnaire du pin

La processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, est un papillon dont la chenille est un important ravageur des conifères. Urticante, cette chenille pose des problèmes de santé publique vis-à-vis de l'homme, aussi bien auprès des professionnels (personnels forestiers par exemple) qu'auprès des particuliers. D'origine méditerranéenne, cette espèce constitue un cas avéré d'expansion vers le nord et en altitude, directement dépendant de l'augmentation des températures hivernales. Cette progression liée aux changements climatiques a été démontrée d'une part *via* une cartographie fine de l'évolution de son aire de distribution en France depuis les années 1980 (résultats de l'Inra d'Orléans) et, d'autre part, par des manipulations expérimentales établissant que des nids déplacés au-delà du front d'expansion ne pouvaient pas survivre.

Aujourd'hui, la processionnaire du pin continue d'étendre son aire de répartition vers le nord, où elle colonise désormais des paysages différents : les pins qu'elle affectionne dans son aire originelle étant plus dispersés sur le front d'invasion, elle s'établit plutôt sur des arbres isolés, ornementaux ou utilisés dans le cadre de gestion des espaces urbains et périurbains. Elle est ainsi en contact plus étroit avec l'homme, et les conséquences sanitaires de son expansion sont importantes.

Depuis quelques années, certaines colonies pionnières sont même observées dans des villes au-delà du front de colonisation. Ces colonies sont probablement le fruit de transports passifs par l'homme (avec les plantations d'arbres de grande taille par exemple) couplés à une survie locale rendue possible par des microclimats urbains qui, à l'échelle locale, miment les changements climatiques.

En collaboration avec d'autres chercheurs, les équipes du CBGP tentent actuellement de décrire finement ces nouveaux processus, leurs conséquences sur le génome de *T. pityocampa*, ainsi que les traits adaptatifs de l'espèce (phénologie, résistance aux températures extrêmes, dispersion...) et ce afin d'anticiper son expansion future et d'en prévenir les impacts.

Contact : Carole Kerdelhue, carole.kerdelhue@supagro.inra.fr

Émergence du virus de la panachure jaune du riz en Afrique

Des changements environnementaux sont à l'origine de l'émergence récente et de la propagation rapide en Afrique du virus de la panachure jaune du riz (appelée « RYMV » pour *Rice yellow mottle virus*).

Les premières épidémies de RYMV sont survenues dans des complexes rizicoles irrigués. Le contrôle de l'eau permet en effet d'intensifier la riziculture, ce qui crée les conditions favorables à l'apparition de la panachure. Le RYMV a ensuite été observé en riziculture de bas-fonds et en riziculture pluviale et c'est dans ces zones que la maladie s'est généralisée. Le RYMV est maintenant présent partout en Afrique où le riz est cultivé, à l'exception jusqu'ici des sites et des périodes où la température est plus basse : en zones d'altitude et en contre-saison. Cependant, la situation évolue et le RYMV a récemment été repéré dans des zones d'altitude, peut-être consécutivement aux changements climatiques et/ou à l'émergence de souches virales adaptées.

L'étude de la diversité virale a montré que la répartition géographique des principales souches de RYMV reflète la disparité des grandes zones climatiques du continent. Les méthodologies récemment développées en biogéographie et en phylogéographie devraient permettre de tester prochainement les liens existants entre facteurs climatiques et structuration des populations de RYMV, avant d'aboutir à l'établissement de scénarios reliant changements environnementaux et épidémiologie virale.

Ces travaux sont réalisés par des chercheurs de l'UMR IPME en partenariat avec un réseau de virologues africains d'instituts nationaux (Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomiques au Burkina-Faso ; Centre National de Recherche Agronomique en Côte d'Ivoire ; Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural à Madagascar ; Institut des Sciences Agronomiques du Rwanda ; Université de Dar es Salaam en Tanzanie) et internationaux *(Africa Rice Center ; International Rice Research Institute)*. Ces travaux ont bénéficié du soutien d'Agropolis Fondation, du ministère des Affaires étrangères français et du partenariat global de recherche scientifique sur le riz et la riziculture *« Global Rice Science Partnership »*.

© J.-L. Notteghem

▲ *Champs de riz infectés à différents stades par le virus de la panachure jaune du riz (Office du Niger au Mali, 2003).*

Contact : Denis Fargette, denis.fargette@ird.fr

Interactions plantes-microorganismes dans différents contextes de stress environnemental

L'**UMR « *Interactions Plantes-Microorganismes-Environnement* » (IPME – IRD, Cirad, UM)** concentre ses activités sur l'étude des interactions entre la plante et les microorganismes en tenant compte des facteurs liés à l'environnement.

Les structures principales
UMR MIVEGEC **Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle** (IRD/CNRS/UM) *66 scientifiques*
UR AGIRs **Animal et Gestion Intégrée des Risques** (Cirad) *26 scientifiques*
UR B-AMR **Bioagresseurs : Analyse et Maîtrise du Risque** (Cirad) *14 scientifiques*
UR Pathologie Végétale (Inra) *13 scientifiques*

Une stratégie de développement durable appliquée à la défense et à l'amélioration des cultures repose sur une bonne connaissance :

❶ de la diversité génétique disponible de l'hôte ;
❷ des mécanismes des interactions (pathogènes et mutualistes) ;
❸ de l'aptitude des parasites à contourner une résistance ;
❹ de l'effet de l'environnement sur les interactions entre plante et organismes associés.

C'est dans ce *continuum* thématique que se situent les activités de l'UMR. Les six équipes qui composent l'UMR développent des études concertées sur les partenaires végétaux et les microorganismes symbiotiques et/ou pathogènes dans différents contextes de stress. Les questions de recherche prioritaires d'IPME portent :

- sur la diversité des microorganismes associés aux plantes et sur les mécanismes qui leur sont associés lors de la colonisation/infection végétale ;
- sur l'organisation, l'évolution et l'adaptation des génomes viraux et bactériens et sur celles des nématodes ;
- sur les réponses et l'adaptation des plantes aux stress biotiques et abiotiques.

L'unité s'intéresse aux problématiques relatives à l'impact de ces processus sur l'agriculture et l'environnement au Sud. Les recherches d'IPME sont réalisées sur des cultures tropicales d'intérêt agronomique, économique et nutritionnel (comme le riz, le manioc, les *citrus*, les légumineuses ou le café) en milieux tropicaux et méditerranéens. Elles s'articulent autour de l'émergence de nouveaux concepts, des moyens de prévention, des outils de lutte contre les maladies des plantes ou encore de l'amélioration de la résistance des plantes aux stress biotiques et abiotiques. Ces travaux ont pour objectifs de :

❶ contribuer à une meilleure gestion et à une durabilité accrue des systèmes de culture ;
❷ renforcer les actions de recherche et de formation de l'UMR grâce à la mise en place de partenariats ;
❸ favoriser le transfert des connaissances vers le Nord comme vers le Sud.

▲ *Des nématodes entomopathogènes à la rescousse du cèdre du Liban.* D.R

Le nématode entomopathogène pour sauver le cèdre du Liban menacé par le changement climatique

Le cèdre du Liban, *Cedrus libani,* est le symbole du drapeau national de ce pays de l'Est méditerranéen. Répandue, du temps des pharaons, du nord au sud du mont Liban, la cédraie originelle est aujourd'hui réduite à quelques forêts relictuelles réparties dans une poignée de réserves naturelles de quelques dizaines d'hectares. Les Libanais sont très attachés à ce symbole national qui renvoie à la grandeur de la Phénicie ancienne.

Situées dans l'étage montagnard à 1400-2000 mètres d'altitude, les forêts actuelles sont soumises à un « durcissement » du climat méditerranéen qui, localement, se caractérise par une forte diminution de la période d'enneigement (passé de quatre ou cinq à un ou deux mois par an) et par l'apparition d'épisodes caniculaires. La canicule de la fin des années 1990 a provoqué l'émergence d'un insecte ravageur endémique, *Cephalcia tannourinensis*, dont la prolifération épisodique constitue la principale menace pesant sur les forêts de cèdres du Liban.

Par ailleurs, au cours de la grave crise phytosanitaire du début des années 2000, deux forêts ont été sauvées *in extremis* grâce à des traitements chimiques aériens. Depuis, le CNRS libanais, l'université Saint-Esprit de Kaslik (Liban) et l'UMR DGIMI collaborent pour mettre en place une gestion intégrée de ce ravageur basée sur l'emploi de nématodes entomopathogènes. Les travaux conduits ont déjà permis d'identifier deux populations de nématodes endémiques de la forêt de Tannourine. D'autres travaux en cours visent à mettre au point des traitements à base de *Steinernema feltiae* contre *C. tannourinensis* dans deux forêts de cèdres au Liban. L'objectif est de contenir les pullulations de cet insecte qui a, cette année, bénéficié de ce qu'on appelle « une sécheresse centennale ».

Contact : Olivier Thaler, olivier.thaler@univ-montp2.fr

Dynamique des insectes ravageurs et de leurs ennemis naturels dans différents environnements

L'objectif de l'**UMR *« Diversité, Génomes et Interactions Microorganismes-Insectes »* (DGIMI – Inra, UM**) est de décrypter, par des approches intégratives, les interactions multitrophiques autour des insectes ravageurs et ainsi de contribuer à améliorer la protection des plantes. Les partenaires des interactions étudiées dans l'UMR sont les insectes ravageurs (modèle lépidoptère essentiellement), leur cortège d'ennemis naturels (virus, complexes némato-bactériens, micro-hyménoptères parasitoïdes), qui sont des agents potentiels de biocontrôle.

Par des approches de génomique comparative, de génomique fonctionnelle, de biologie cellulaire ou de suivi de traits d'histoire de vie, les équipes de l'UMR s'attachent à comprendre comment les mécanismes moléculaires régissent ces interactions et comment celles-ci sont affectées par des modifications de l'environnement biotique ou abiotique. En parallèle, différents projets dans l'UMR s'intéressent à la dynamique de ces interactions en fonction des conditions environnementales. Il s'agit alors principalement de comparer, dans différents éco- ou agro-systèmes, la diversité spécifique des insectes ravageurs et de leurs ennemis naturels. •••

Impacts du changement climatique sur la répartition des bioagresseurs et le déclenchement des épidémies

L'**UR** ***« Bioagresseurs : Analyse et Maîtrise du Risque »*** **(B-AMR – Cirad)** cherche à mieux comprendre les mécanismes d'invasion et de développement des maladies et des ravageurs. Les bioagresseurs réduisent en effet la productivité des cultures, compromettent leur durabilité et affectent la qualité de la production.

Ces menaces sont particulièrement présentes dans les agrosystèmes tropicaux. B-AMR œuvre pour améliorer le contrôle des bioagresseurs, mais aussi la gestion des risques et la prédiction des dégâts qui leur sont liés. Les stratégies de lutte proposées tiennent compte des contextes socioéconomiques, éthiques et/ou politiques, ainsi que des intérêts des différents acteurs. De plus, l'impact environnemental doit être minimisé pour respecter la santé humaine et animale et permettre à la faune auxiliaire de jouer pleinement son rôle régulateur. Les compétences au sein de l'unité permettent de traiter l'ensemble des problématiques scientifiques liées à l'émergence et au développement des bioagresseurs des cultures pérennes en milieu tropical.

Depuis les plantations monospécifiques jusqu'aux écosystèmes désertiques, en passant par les agroforêts, B-AMR observe un *continuum* partant de systèmes de culture fortement anthropisés vers des écosystèmes quasiment naturels. Chacun de ces écosystèmes voient se développer des populations particulières de bioagresseurs et, à chaque fois, leur systématique, leur biologie et leurs relations avec l'environnement sont singulières. Il est donc nécessaire d'envisager des modes de gestion au cas par cas. Cependant, dans toutes les situations, le questionnement scientifique et les axes de recherche qui en découlent sont, eux, très proches. Ainsi, au-delà d'un modèle particulier, depuis le moment du diagnostic et jusqu'à la sortie opérationnelle, des questions transversales de recherche se posent aux différentes équipes de l'unité :

❶ **Quels sont les facteurs de déclenchement des invasions ?** Pour répondre, il convient d'étudier la caractérisation écologique, biologique et génétique des espèces envahissantes, la caractérisation des écosystèmes envahis et celle de leur dynamique, le tout en restant focalisé sur la notion de « pratiques agricoles ».

❷ **Comment se développent les pullulations et les épidémies ?** Il s'agit d'étudier les caractéristiques fonctionnelles des organismes en relation avec l'environnement (génétique quantitative, modélisation).

❸ **Comment améliorer la gestion du risque « bioagresseur » ?** Le succès des stratégies de lutte est intimement lié à la connaissance des interactions entre milieux et sociétés humaines. La modélisation et les systèmes d'information géographique permettent de spatialiser et de cartographier le risque.

On le sait, les facteurs environnementaux, et notamment climatiques, jouent un rôle important dans le déclenchement des invasions et dans le développement des épidémies. De même, le changement climatique aura un impact important sur la répartition des populations de bioagresseurs et le déclenchement des épidémies. Il est important d'anticiper ces phénomènes afin de les gérer au mieux.

Voir un exemple de projet co-conduit par l'UR B-AMR page 82.

▼ *Systèmes agroforestiers de caféiers.*
© Cirad

▲ *Chancre bactérien sur abricotier.* © UR PV-Inra

Pour une protection durable des cultures maraîchères dans un contexte de changement global

Les recherches de l'**UR « *Pathologie Végétale* » (Inra)** ont pour objectif de développer des méthodes de lutte efficaces et raisonnées afin de protéger la santé des plantes dans un contexte de production agronomique durable et de haute qualité. Elles sont focalisées sur les maladies bactériennes, fongiques et virales des fruits et des légumes du bassin méditerranéen.

Les méthodes préventives définies sont prophylactiques et elles s'appuient sur :

❶ un diagnostic précoce et efficace ;
❷ la gestion durable des résistances variétales ;
❸ l'utilisation d'agents de lutte biologique ;
❹ la prévision des maladies par la compréhension de la biologie et de l'évolution des pathogènes (y compris l'épidémiologie des maladies qu'ils provoquent).

Les recherches de l'unité reposent sur un partenariat étroit avec les acteurs du développement agricole et sur des coopérations scientifiques nationales et internationales. Elles s'articulent autour de deux pôles de l'Inra Provence-Alpes-Côte d'Azur : « Production horticole intégrée » et « Adaptation au changement global ». Un aspect du travail de ce dernier est de projeter des scénarios sur les évolutions du paysage agricole face à l'intensification d'un ensemble de pressions d'utilisation des terres. Les chercheurs explorent ainsi le rôle du paysage sur l'émergence et la dissémination des maladies des plantes.

Voir un exemple de projet conduit par l'UR Pathologie Végétale page 81. •••

© HortSys

▲ *Les filets protègent les cultures mais modifient le microclimat sous filet.*

Concevoir des systèmes de culture maraîchers mieux régulés

Des études sur l'utilisation en maraîchage de filets anti-arthropodes ont été réalisées par l'UR HortSys *(voir page 73)*, en partenariat :

- au Bénin, avec l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin et l'Université d'Abomey-Calavi ;
- au Kenya, avec l'*International Centre of Insect Physiology and Ecology*, le *Kenya Agricultural Research Institute* et l'Université d'Egerton ;
- en Tanzanie, avec la société AtoZ.

Les financements proviennent de différentes sources, parmi lesquelles l'*United States Agency for International Development* et la fondation Mutavie (Macif, France).

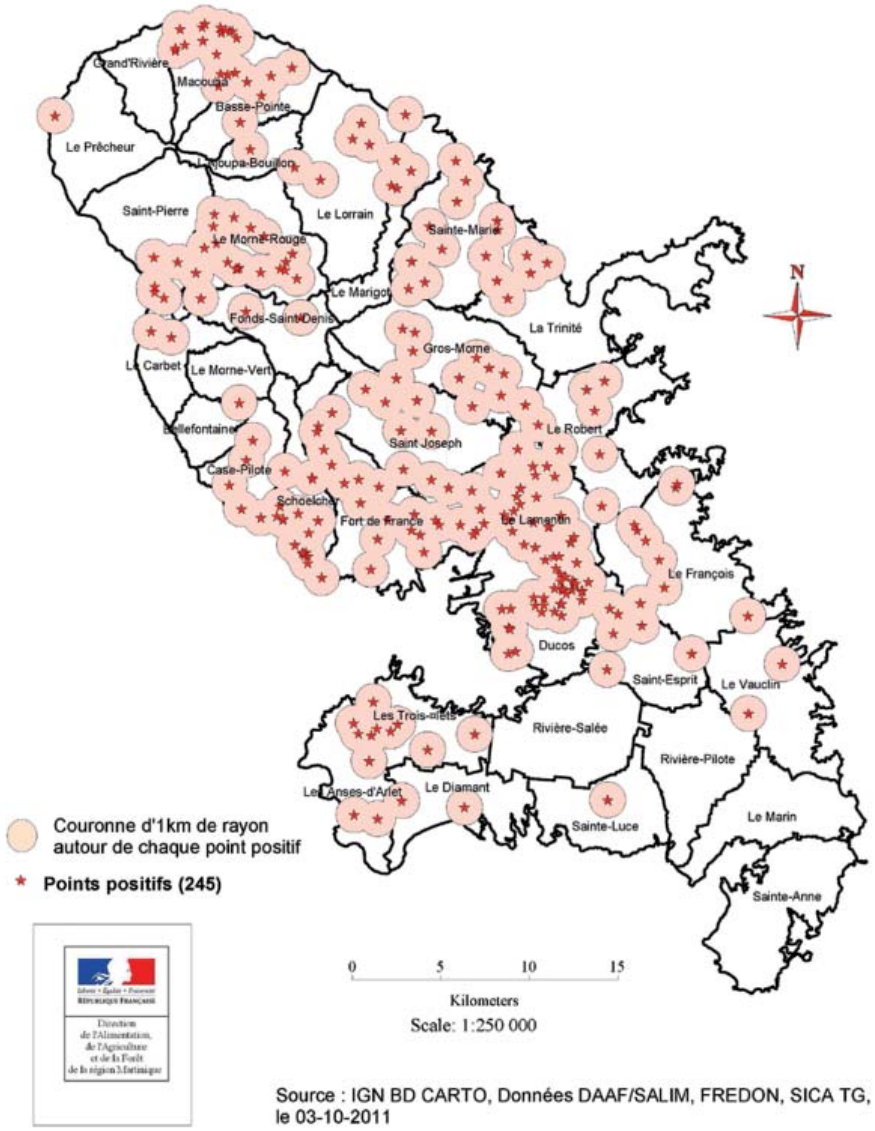
Ces recherches ont montré :

❶ qu'il était possible de réduire de 70 à 100 % les traitements par intrants sur le chou et la tomate ;

❷ que les filets assuraient une protection efficace contre les lépidoptères et qu'ils retardaient les infestations de pucerons et d'aleurodes, voire les empêchaient s'ils étaient combinés à des répulsifs. L'écosystème « sous filet » est toutefois susceptible d'être perturbé par le changement climatique, il nécessitera donc des adaptations.

Il faut noter que l'on observe d'ores et déjà des différences entre les hauts plateaux du Kenya et les zones de basse altitude du Bénin en termes d'impact sur le rendement (*via* l'effet sur la physiologie de la plante) et d'incidence de maladies fongiques, comme l'ont montrées les études d'HortSys déjà publiées sur la modification du microclimat sous filets.

Contact : Éric Malézieux, malezieux@cirad.fr



▲ *Répartition spatiale de la Cercosporiose Noire, maladie foliaire du bananier causée par le champignon ascomycète* **Mycosphaerella fijiensis**, *en Martinique.*

Bilan des points détectés positifs entre le 20/09/2010 et le 16/09/2011.

Gestion des agents pathogènes de cultures dans un contexte de changement global et de réduction des produits phytosanitaires

Les recherches de l'**UMR** *« Biologie et Génétique des Interactions Plante-Parasite »* **(BGPI – Inra, Cirad, Montpellier SupAgro)** portent sur des pathosystèmes d'intérêt agronomique, dans l'objectif de lutter contre les maladies des plantes cultivées principalement en zones tropicales et méditerranéennes.

Ces agro-écosystèmes subissent en effet des attaques d'agents pathogènes (établis ou introduits) pouvant avoir des conséquences économiques importantes sur les cultures. Or, ces attaques pourraient encore augmenter dans un contexte de mondialisation des échanges, de changement climatique et de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires. Aussi, l'UMR BGPI se fixe-t-elle de comprendre les interactions biotiques en intégrant des échelles d'approche allant du gène au paysage et de contribuer ainsi à l'élaboration de systèmes agronomiques innovants et durables.

Les travaux de recherche de l'unité allient des approches mécanistiques et populationnelles. L'intention est de décrire et de comprendre l'émergence et le développement de maladies à champignons, à bactéries et à virus.

Étude des processus épidémiologiques de maladies transmises par les insectes

Une partie des recherches conduites au sein de l'équipe « Épidémiologie végétale et vection » (UMR BGPI) vise à comprendre les processus de dissémination de maladies de plantes transmises par vecteurs aériens. L'enjeu est de développer des modèles permettant de quantifier, d'expliquer et/ou de simuler les épidémies associées à des pathogènes modèles :

- la sharka (maladie de quarantaine provoquée par le *Plum pox virus* ou « PPV », un potyvirus transmis, sur le mode non-persistant, par de nombreuses espèces de pucerons) ;
- l'enroulement chlorotique de l'abricotier (maladie provoquée par *Candidatus Phytoplasma prunorum*, un phytoplasme transmis, sur le mode persistant multipliant, par le psylle *Cacopsylla pruni*) ;
- le pied chétif du blé (maladie provoquée par le *Wheat dwarf virus* ou « WDV », un mastrevirus transmis, sur le mode persistant non multipliant, par des cicadelles du genre *Psammotettix*).

L'épidémiologie de ces maladies repose en partie sur les paramètres biologiques (dynamique de populations, cycle de vie, comportement alimentaire…) des vecteurs associés. Bien qu'il ne s'agisse pas actuellement d'un axe important des travaux de l'UMR BGPI, le réchauffement climatique ne peut être considéré comme un élément neutre dans ce contexte.

En effet, en favorisant/défavorisant l'installation des vecteurs dans les zones cultivées et sauvages réservoirs d'agents pathogènes, un tel paramètre abiotique impacte indirectement les processus d'émergence, d'installation et de propagation des maladies sur lesquelles l'unité travaille. Aussi, cette variable devra, à terme, être considérée dans la conception de modèles d'estimation des risques sanitaires tels que ceux que développe l'UMR BGPI.

Contact : Emmanuel Jacquot, emmanuel.jacquot@supagro.inra.fr

Pour plus d'informations : http://umr-bgpi.cirad.fr/equipes/equipe6.htm

▲ *L'escargot* Cochlicella acuta *(appelé « cornet étroit »), originaire d'Europe méditerranéenne et atlantique, a été introduit en Australie où il a un comportement invasif.*

© F. Welter Schultes

Des agents auxiliaires pour favoriser les services écosystémiques en Australie

Le *« Laboratoire européen du CSIRO » (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)* concentre ses recherches sur la fourniture de services écosystémiques par l'agriculture et l'environnement en Australie, au travers de l'introduction et de la dissémination d'organismes exotiques bénéfiques. Les recherches menées à Montpellier visent deux principaux objectifs, dans le contexte de l'évolution des patterns climatiques en Australie, telle que prédite par les modèles du CSIRO :

- d'une part, l'étude et l'atténuation des impacts des espèces invasives sur la production agricole, la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, qui risquent de s'accentuer avec les changements climatiques à venir ;
- d'autre part, l'optimisation du stockage et de la séquestration du carbone dans le sol, afin de limiter l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère, grâce à l'introduction de certaines « espèces ingénieures » d'invertébrés, capables d'augmenter la capacité des sols à stocker du carbone, notamment dans les zones d'agriculture extensive.

Ainsi, le premier service écosystémique sur lequel le centre CSIRO de Montpellier concentre ses efforts concerne la gestion des ravageurs et maladies des plantes invasives. En effet, les invasions biologiques en Australie provoquent des perturbations au sein des écosystèmes. Avec l'aridification croissante du continent, les espèces invasives d'origine méditerranéenne risquent d'étendre leur aire de répartition aux zones jusqu'alors tempérées, affectant la production agricole et menaçant la résilience des écosystèmes naturels.

Ainsi, les recherches du CSIRO portent sur la prospection, dans leur environnement d'origine, d'ennemis naturels de ces espèces méditerranéennes nuisibles, dans le but de mettre au point des techniques de lutte biologique ciblées et efficaces contre les espèces en question. Les laboratoires du CSIRO identifient et sélectionnent les agents de lutte biologique et conduisent les analyses de risques nécessaires avant toute introduction en Australie. Actuellement, les efforts se concentrent en particulier sur l'escargot *Cochlicella acuta* et les adventices pérennes de la famille des Fabacées qui ont envahi respectivement les cultures, les pâturages extensifs et les zones boisées naturelles du Sud de l'Australie.

Le second service écosystémique sur lequel le laboratoire montpelliérain est investi concerne la capacité de stockage et de séquestration du carbone dans le sol. Les scarabées coprophages (ou « bousiers ») sont des espèces ingénieures des écosystèmes qui permettent un recyclage du carbone organique et une amélioration de la capacité de rétention d'eau du sol. Le CSIRO s'intéresse ainsi à la sélection, l'élevage et l'analyse de risque liée à l'introduction d'espèces européennes de bousiers, à même de favoriser le stockage du carbone dans les zones tempérées et méditerranéennes de l'Australie, notamment au sein des pâturages et des zones de parcours qui ont subi de fortes perturbations. •••

▼ ***Le longicorne asiatique*** **(Anoplophora glabripennis)** ***est invasif en Amérique du Nord et en Europe centrale.***

D.R.

D.R.

▲ ***Mouche de l'olive*** **(Bactrocera oleae).**

Lutte biologique pour l'agriculture et l'environnement américains

Le « ***Laboratoire européen de lutte biologique (EBCL)*** **» de l'USDA/ ARS** ***(United States Department of Agriculture/ Agriculture Research Service)*** est intégré au campus Agropolis. Il a pour vocation de mener des recherches sur la lutte biologique contre les arthropodes et les plantes indésirables ou invasifs. Nombre de ces espèces sont originaires d'Europe, d'Asie ou d'Afrique, c'est pourquoi le laboratoire est implanté en Europe, afin de prospecter dans les régions d'origine les agents de lutte biologique qui puissent être utilisés aux États-Unis contre ces espèces nuisibles. La répartition géographique et le potentiel invasif de ces espèces sont fortement dépendants des conditions environnementales, y compris les variations saisonnières de températures et de précipitations.

Ainsi, les changements des conditions climatiques peuvent affecter localement le caractère invasif des espèces et l'efficacité de leurs agents de lutte biologique. Les changements climatiques intervenant dans l'hémisphère Est peuvent également modifier les aires de répartition naturelles des espèces en question. La compréhension des processus en jeu est au cœur des activités du laboratoire, dans l'objectif de trouver les agents de lutte les plus efficaces et les mieux adaptés.

Pour chaque projet, une analyse climatique basée sur la géographie est conduite afin (i) d'évaluer la répartition connue et projetée de l'espèce cible aux États-Unis et (ii) de sélectionner les régions à explorer en Eurasie pour trouver les agents de lutte adéquats. Les plantes actuellement étudiées au laboratoire incluent : la canne de Provence *(Arundo donax)*, la centaurée du solstice *(Centaurea solstitialis)*, l'olivier de Bohême *(Elaeagnus angustifolia)*, le genêt de Montpellier *(Genista monspessulana)*, la soude roulante *(Salsola tragus)*, l'orge chevelue *(Taeniatherum caput-medusae)* et la venténate douteuse *(Ventenata dubia)*. Les arthropodes auxquels s'intéresse le laboratoire incluent : le longicorne asiatique et le capricorne asiatique des agrumes *(Anoplophora glabripennis, A. chinensis)*, la mouche de l'olive *(Bactrocera oleae)*, des punaises *(Bagrada hilaris, Halyomorpha halys, Lygus* spp.) et une tique *(Rhipicephalus annulatus)*. Le laboratoire dispose également d'une station expérimentale à Thessalonique, en Grèce, où sont étudiés les effets du climat sur les populations de moustiques, y compris le moustique-tigre asiatique *(Aedes albopictus)* et sur la transmission du virus du Nil occidental.

Influence des changements environnementaux sur les interactions hôtes/pathogènes responsables d'épidémies

L'**UMR *« Interactions Hôtes-Pathogènes-Environnements »* (IHPE – UM, UPVD, Ifremer, CNRS)** s'intéresse à différents systèmes biologiques en interaction impliquant des espèces d'invertébrés qui présentent un intérêt :

- médical ou vétérinaire (interactions mollusques-schistosomes) ;
- aquacole (interactions huîtres-pathogènes-environnement) ;
- écologique (interactions coraux-pathogènes-environnement).

L'unité IHPE développe des approches intégratives qui prennent en compte les paramètres environnementaux influençant ces interactions à différentes échelles, depuis les mécanismes moléculaires jusqu'à des niveaux d'intégration populationnels et évolutifs. Sa recherche s'inscrit donc à l'interface entre la biologie fonctionnelle, la biologie des populations, l'écologie et l'évolution.

Pour atteindre ses objectifs, l'UMR a acquis cette dernière décennie des compétences multiples allant de la génomique environnementale (approches « omiques ») à l'écologie, en passant par la bioinformatique et l'épigénétique. Elle s'appuie également sur des plateformes techniques installées sur ses deux sites montpelliérain et perpignanais.

Ainsi, avec un financement régional, la plateforme Tecnoviv de Perpignan, par exemple, a récemment acquis des moyens technologiques et humains dans le cadre de son activité d'analyse de données de séquençage à haut débit. Elle peut donc désormais traiter, de manière globale et exhaustive, d'importants jeux de données (méta)génomiques et transcriptomiques, à la fois sur les hôtes et sur leurs microorganismes ou parasites associés.

Les changements globaux, ainsi que l'accroissement des mouvements de populations des hôtes comme des pathogènes, ont de graves conséquences sur l'émergence ou la réémergence d'épidémies, d'épizooties ou de zoonoses. Plusieurs projets menés au sein de l'unité abordent les processus par lesquels ces changements environnementaux agissent sur les interactions hôtes/pathogènes, du niveau des génomes à celui des écosystèmes. Ce travail repose sur l'intégration d'approches multiples, *via* une collaboration partenariale avec d'autres laboratoires. Ces partenariats ont récemment permis d'obtenir des financements nationaux mais aussi internationaux.

Parmi eux, on citera notamment deux projets ANR menés en collaboration avec des laboratoires d'Agropolis :

❶ Analyse de la manipulation comportementale par un virus dans une interaction hôte/parasitoïde (ANR Blanc *Bodyguard*, coordonné par l'UMR MIVEGEC).

❷ Étude des mécanismes de l'adaptation des coraux à des environnements fluctuants (ANR Bioadapt « *Adaptive processes in cnidarians : integrative study of the response to thermal stress and climate change, from genes to populations* » en collaboration avec l'ISEM).

L'UMR IHPE participe également au réseau « Interactions microorganismes-hôtes », structuré par l'Université de Montpellier. •••

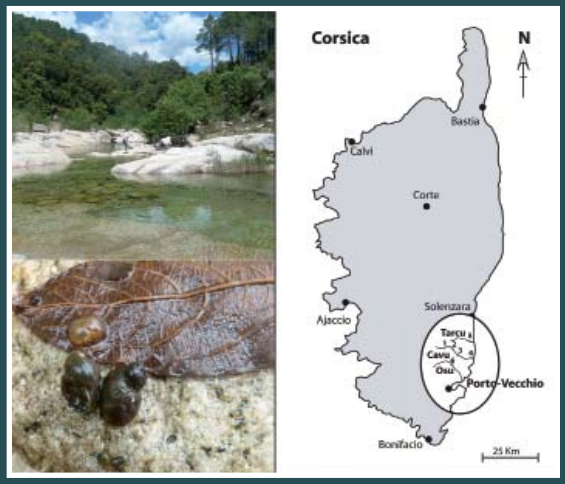
(Ré)émergence de la schistosomose dans un contexte de changements globaux

La schistosomose, ou bilharziose, est une parasitose humaine endémique des pays tropicaux ou subtropicaux. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), cette maladie touche environ 200 millions de personnes et cause 250 000 décès chaque année. L'agent responsable de la maladie, un plathelminthe du genre *Schistosoma*, présente un cycle de vie complexe avec un passage par deux phases larvaires aquatiques, un hôte intermédiaire mollusque et un hôte définitif vertébré siège de la reproduction sexuée.

Du fait des changements globaux (modification de l'aire de répartition des mollusques vecteurs, mouvements des populations infectées) cette pathologie est en émergence, voire en réémergence, dans plusieurs régions du globe. À Oman, par exemple, où de nouveaux cas de schistosomose aigüe ont été détectés, une nouvelle population de *Schistosoma mansoni* a été identifiée par le laboratoire IHPE. Il apparaît qu'une modification de sa chronobiologie a permis au parasite de s'adapter à la présence crépusculaire de rongeurs qui lui servent de réservoir.

Par ailleurs, pour la première fois, des cas autochtones de schistosomose ont été rapportés en Corse, où la température moyenne de l'eau des rivières a augmenté de 1 °C. L'apparition du parasite y est très récente (2011), et l'IHPE a pu montrer qu'il s'agit d'une population d'hybrides entre *Schistosoma bovis*, parasite animal, et *Schistosoma haematobium*, agent responsable de la schistosomose urinaire humaine.

La persistance d'une phase adulte dans un hôte réservoir et la capacité de changement d'hôte, que ce soit par des modifications du comportement ou *via* l'hybridation entre espèces proches, font de ce parasite un pathogène zoonotique dont la répartition est influencée par les changements globaux.



© A. Théron

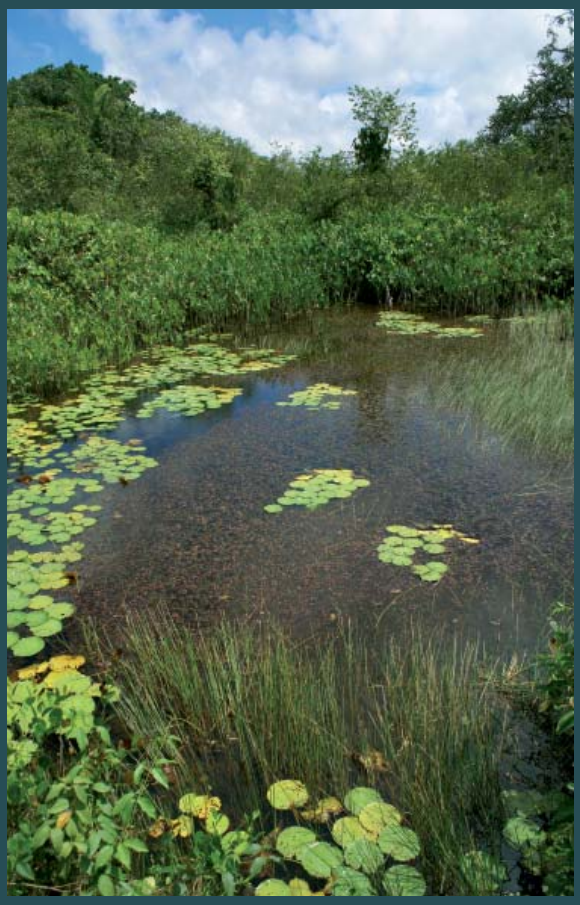
▲ *Le mollusque* **Bulinus truncatus**, *hôte intermédiaire de* **Schistosoma haematobium**, *a été trouvé dans trois rivières du Sud-Est de la Corse.*

Afin d'aborder cette problématique de façon transversale, l'UMR IHPE a mis en place des projets (financés par l'OMS, l'ANR et la Commission européenne) combinant éco-épidémiologie, analyses pangénomiques et études fonctionnelles. Une plus grande pluridisciplinarité des approches est en effet essentielle pour mieux comprendre les facteurs de risques impliqués dans les (ré)émergences de la schistosomose mais aussi pour en améliorer le contrôle.

Contact : Jérôme Boissier, boissier@univ-perp.fr

Pour plus d'informations : www.cnrs.fr/inee/communication/breves/b063.htm

Guyane française : liens entre l'évolution des cas d'ulcère de Buruli et le changement climatique



▲ *Les zones marécageuses, telles que celles-ci en Guyane française, sont propices à la bactérie responsable de l'ulcère de Buruli.*

R. Gozlan © IRD

On méconnaît les modes de transmission de l'agent microbien *Mycobacterium ulcerans* responsable de l'ulcère de Buruli, la troisième mycobactériose touchant l'homme dans le monde après la lèpre et la tuberculose. *A fortiori*, on ne disposait pas jusqu'ici de données chronologiques de la prévalence de cette maladie cutanée (séries temporelles) permettant une exploration biomathématique de la dynamique des cas. En particulier, on ne savait donc pas si les cas d'ulcère de Buruli montraient une saisonnalité.

Grâce à une étude menée par l'UMR MIVEGEC sur les cas d'ulcère de Buruli enregistrés en Guyane française depuis 1969, on a, pour la première fois, établi une saisonnalité marquée entre mars et avril sur ce territoire. Cette saisonnalité est conditionnée par l'environnement, que ce soit parce qu'il existe des réservoirs ou des vecteurs-hôtes dont le nombre croît sur cette même période, ou que ce soit en raison de l'existence d'un milieu particulier favorable au microbe à ce moment de l'année (des marécages asséchés, par exemple, augmentent le risque d'exposition à ce microorganisme persistant).

Au-delà, l'étude montre, pour la première fois également, un effet à plus long terme du phénomène *El Niño/Southern Oscillation* qui, en intervenant sur les régimes de pluies dans la zone, entraîne une modification des habitats marécageux par assèchement. Cela conduit à une plus grande fréquentation de ces espaces par l'humain (à travers notamment la chasse ou la pêche) et induit donc un contact plus important avec le microbe.

Ainsi, cette étude, menée en Guyane française dans le cadre du LabEx CEBA (Centre d'étude de la biodiversité amazonienne), scénarise la possibilité d'une augmentation des cas d'ulcères de Buruli liée aux conditions climatiques intervenues ces dernières années. Autrement dit : en générant des modifications d'habitats et d'écosystèmes, le changement climatique contribue à accroître le nombre des infections par la mycobactérie.

Contact : Jean-François Guégan, jean-francois.guegan@ird.fr

Pour plus d'informations : www.nature.com/emi/journal/v3/n8/full/emi201456a.html

Changements environnementaux et maladies infectieuses

L'**UMR** ***« Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle »*** **(MIVEGEC – IRD, CNRS, UM)** s'intéresse aux thématiques complémentaires de l'écologie de l'évolution et du contrôle de la transmission des agents infectieux, que ceux-ci soient à transmission directe ou indirecte, par l'entremise de vecteurs ou de réservoirs.

Ses champs d'investigation scientifique relèvent de l'écologie, de l'évolution, de la génétique, de l'infectiologie, mais aussi de la santé publique. Parce que les agents infectieux ou leurs hôtes vecteurs ou réservoirs peuvent être étroitement dépendants des conditions bioclimatiques, la problématique des changements environnementaux globaux — et en particulier celle du changement climatique — est prise en compte dans l'UMR pour comprendre et anticiper l'évolution (attendue ou probable) d'un élargissement des aires de distribution des maladies infectieuses humaines ou animales.

Les recherches de MIVEGEC se déclinent sur plusieurs niveaux d'organisation du vivant :

- l'écosystème (incluant ses variables physiques, biologiques et socioéconomiques) ;
- les populations d'hôtes (vertébrés et invertébrés) et celles d'agents pathogènes (virus, bactéries, parasites), avec leurs caractères phénotypiques, génétiques, évolutifs et de traits d'histoire de vie ;
- les agents pathogènes (vus par la génétique et la biologie cellulaire) ;
- les relations entre les différentes composantes des systèmes (interactions hôtes-agents pathogènes ou de génome à génome).

MIVEGEC conduit ses recherches dans de nombreuses régions du monde : Bolivie, Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Gabon, Thaïlande, Vietnam, régions françaises d'outre-mer (Guyane, Nouvelle-Calédonie, La Réunion).

La communauté MIVEGEC est par ailleurs particulièrement impliquée dans les activités de formation et d'enseignement à Montpellier (UM), mais aussi ailleurs en France et à l'international.

▲ *Race bovine du Burkina Faso.*

© UMR INNOVATION

Environnement et maladies à trypanosomatidés chez l'homme et les animaux

L'**UMR** ***« Interactions hôtes-vecteurs-parasites-environnement dans les maladies tropicales négligées dues aux trypanosomatidés »*** **(InterTryp – Cirad, IRD)** mène des recherches sur la maladie du sommeil et la maladie de Chagas chez l'homme, les trypanosomoses animales et les leishmanioses. InterTryp développe des méthodes de prévention et de lutte contre ces maladies négligées, en s'adaptant aux contraintes des pays en développement. Les travaux menés dans l'unité visent à améliorer la connaissance du triptyque parasites-vecteurs-hôtes en tenant compte des facteurs climatiques, écologiques et socioéconomiques. Pour ce faire, l'unité développe une approche originale (i) commune à l'homme et aux animaux, (ii) intégrée grâce à la prise en compte de toutes les composantes du cycle de transmission des parasites et (iii) basée sur des questions « de terrain ».

L'UMR s'intéresse en particulier à l'étude des interactions « bovins-trypanosomes » et aux traits adaptatifs qu'ont pu développer certaines races bovines ouest-africaines. Ces races sont à la fois capables de tolérer les infections par les trypanosomes et sont remarquablement adaptées à un environnement agro-écologique particulièrement difficile (températures très élevées, période de sécheresse avec une forte pénurie des ressources alimentaires). L'étude de la diversité génétique neutre et adaptative des races tropicales est ainsi conduite en étroite collaboration avec le département de génétique animale de l'Inra et avec certains partenaires du Sud comme le Centre international de recherche-développement sur l'élevage en zone sub-humide au Burkina Faso (CIRDES). L'unité participe également, avec l'Inra et l'UMR Selmet, à un projet portant sur l'adaptation des races bovines aux conditions méditerranéennes.

Voir un exemple de projet dont l'UMR InterTryp est partenaire page 82. •••

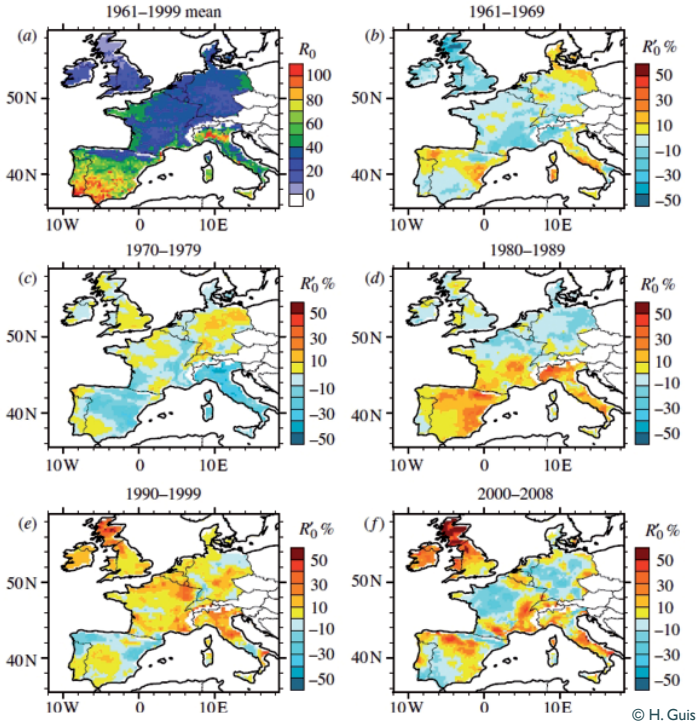
Projet RELAIS et risques d'épidémies en Amérique latine : mieux comprendre les processus qui lient l'environnement à la santé humaine

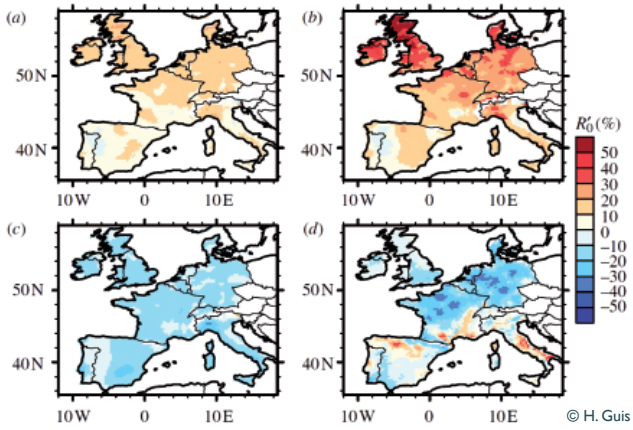
Comment expliquer la distribution de la malaria en Amazonie ? Pourquoi, certaines années, la malaria connaît-elle de fortes épidémies à la montée des eaux des fleuves plutôt qu'à la baisse comme c'est habituellement le cas ? Pourquoi la leishmaniose est-elle si virulente à la frontière entre le Pará et le Maranhão ? Quelles seront les conséquences du changement climatique sur la répartition des maladies vectorielles en Amazonie ? De même, comment les nouveaux barrages en construction, tels que celui du fleuve Xingu, vont-ils modifier l'environnement et augmenter les risques d'apparition de nouvelles épidémies ?

Les réponses à ces questions complexes sont à chercher dans des jeux de données décrivant l'environnement aussi bien que la société, à des échelles allant du moustique à la juridiction de l'État.

Les menaces épidémiologiques en Amazonie sont à mettre en relation avec les changements environnementaux liés au réchauffement climatique et à la création de grandes infrastructures de développement territorial. Pour avancer dans la compréhension de ces risques, des chercheurs brésiliens et français ont imaginé le projet RELAIS *(Regional Epidemiological Landscape Amazon Information System)*, un partenariat avec les UMR ESPACE-DEV *(voir page 20)* et MIVEGEC notamment. Ces chercheurs sont issus d'horizons très différents, allant de la biologie moléculaire à l'observation de la Terre par satellite, en passant par l'entomologie, la médecine ou l'anthropologie. Ensemble, ils vont tenter de mieux comprendre les processus qui lient l'environnement à la santé humaine.

Contact : Laurent Durieux, laurent.durieux@ird.fr





▲ ***Paramètres de propagation de la fièvre catarrhale ovine.***

Chaque carte montre les évolutions (entre la période de référence 1961-1999 et la période 2000-2008) d'un paramètre précis lié à la transmission de la fièvre catarrhale chez les ruminants : (a) taux de piqûres, (b) durée moyenne de la période d'incubation extrinsèque (i.e. temps nécessaire au virus ingéré par le vecteur pour rendre ce vecteur « infectant » lors du repas de sang suivant), (c) taux de mortalité des vecteurs, (d) ratio vecteur/hôte.

◀ ***Évolution du risque de transmission de la fièvre catarrhale ovine.***

Chaque carte spatialise, sur une tranche d'années données entre 1961 et 2008, l'évolution du risque de transmission de la maladie. Période de référence : août à octobre. Carte (a) : Moyenne du R0 pour la période 1961-1999.
Cartes (b) à (f) : Évolutions, par rapport à la valeur de référence de 1961-1999, en pourcentage et par décade.

Évaluation de l'impact du climat sur le risque de transmission de la fièvre catarrhale ovine en Europe

Les variations du taux de reproduction de base (« R0 », correspondant au risque de transmission) de la fièvre catarrhale ovine ont été évaluées en Europe pour les périodes passées et présente (1960-2008) mais aussi futures (jusqu'en 2050), en utilisant un ensemble de onze modèles climatiques. Ces évaluations ont été faites à partir, notamment, de modèles de l'effet de la température sur le taux de piqûres, sur l'abondance des vecteurs, sur la durée de la période d'incubation extrinsèque et sur le taux de mortalité des vecteurs. Ces modèles spatialisés ont permis de produire des cartes de risques et d'évaluer l'incertitude associée à ces simulations.

Les résultats suggèrent, d'une part, que le risque a augmenté et qu'il va continuer de progresser dans les années à venir, mais également que différents mécanismes sont en jeu dans le Sud et dans le Nord de l'Europe.

Ont collaboré à ce projet de recherche : le Cirad (*via* les unités de recherche AGIRs, CMAEE et TETIS), l'Université de Liverpool (Royaume-Uni) et le *Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria* (Espagne). Les financements émanaient des projets européens : ENSEMBLES, CIRCE, NERC *(Natural Environment Research Council)* et du *Leverhulme Trust* (Royaume-Uni).

Contact : Hélène Guis, helene.guis@cirad.fr

Pour plus d'informations : http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/9/67/339.full.pdf+html?sid=1807df90-97b1-4057-a5d5-bc6fa9aa0df3

Surveillance et gestion des maladies animales et zoonotiques

L'**UMR *« Contrôle des Maladies Animales Exotiques et Émergentes »* (CMAEE – Inra, Cirad)** mène des recherches intégrées visant à améliorer la surveillance et l'anticipation des risques d'émergence et de diffusion des maladies animales et zoonotiques, ainsi qu'à optimiser leur prévention et leur contrôle. Ces recherches portent sur les interactions entre les microorganismes pathogènes, leurs hôtes domestiques et sauvages et les vecteurs de ces pathogènes.

L'unité prend en compte aussi bien les facteurs environnementaux ou socioéconomiques que les changements globaux (y compris climatiques). Le travail du CMAEE vise à décrire et à caractériser :

- d'une part, les déterminants de l'émergence des agents pathogènes et ceux de leur transmission et de leur diffusion ;
- d'autre part, les processus infectieux et la dynamique des populations de vecteurs.

Les échelles d'analyse utilisées dans ces opérations vont du niveau moléculaire à celui des populations.

La stratégie scientifique se décline en trois thèmes :

❶ Dynamique des maladies et des vecteurs
❷ Contrôle des maladies et des vecteurs
❸ Anticipation des risques et veille

Au sein de ces trois thèmes, les équipes de l'unité s'appliquent à mettre en permanence en corrélation la recherche elle-même et la surveillance de leurs objets de recherche, à savoir : les maladies émergentes ou enzootiques du Nord et du Sud (à transmission vectorielle ou directe) ainsi que certaines zoonoses.

▲ *Capture de buffle au Zimbabwe.*
© D. Cornélis

Gérer la santé animale pour limiter les risques d'épizooties

L'**UR** *« Animal et Gestion Intégrée des Risques »* **(AGIRs – Cirad)** s'est donné pour objectif de comprendre, prédire et gérer les risques sanitaires liés à l'animal domestique et sauvage au Sud, et ce dans un contexte mondial en mutation (simplification des milieux et perte de biodiversité, urbanisation, déforestation, mondialisation des échanges, réchauffement climatique). Pour ce faire, un large *corpus* de méthodes est mobilisé : épidémiologie descriptive, écologie, géomatique, biostatistiques, géographie de la santé, anthropologie, épidémiologie quantitative et modélisation de systèmes complexes.

Deux approches complémentaires sont conjointement mises en œuvre au sein de programmes et de projets menés sur les divers terrains d'étude d'AGIRs que sont l'Asie du Sud-Est, l'Afrique australe, Madagascar et le pourtour méditerranéen.

La première approche vise à identifier les déterminants des comportements et de l'évolution dans le temps et l'espace de maladies animales — zoonotiques ou non — importantes en termes d'impacts sanitaires et économiques. Ces maladies peuvent être émergentes ou endémiques, vectorielles ou à transmission directe (*influenza* aviaire, fièvre aphteuse, tuberculose, peste porcine africaine, fièvre de la Vallée du Rift, *etc.*). Par la mortalité, la morbidité ou la baisse de production de lait ou de viande qu'elles engendrent, elles pèsent lourdement sur l'économie et les capacités de subsistance des petits élevages familiaux.

La deuxième approche se focalise sur le fonctionnement des socioécosystèmes dans lesquels cohabitent des hôtes (animaux sauvages et domestiques, homme – qu'il soit éleveur et/ou consommateur) et des agents pathogènes. Les objectifs sont d'évaluer les risques pour la santé animale et la santé publique ainsi que de proposer des méthodes de gestion de ces risques (surveillance et contrôle) qui soient adaptées et optimisées pour les socioécosystèmes considérés. En effet, le contrôle efficace des maladies animales nécessite de réagir rapidement face à une émergence épizootique. Relever ce défi est primordial dans les pays du Sud où les ressources (compétences spécifiques, financements, outils informatiques, *etc.*) sont limitées.

L'unité travaille étroitement avec de nombreux partenaires — institutions de recherche et de développement — en France et au Sud (Afrique et Asie) et elle est impliquée dans plusieurs réseaux internationaux. ■

Stratégies et politiques sanitaires dans le cadre du changement climatique

La nécessaire adaptation des stratégies et des politiques sanitaires en réponse au changement climatique s'inscrit dans un contexte plus large de mutations globales concernant la demande croissante en produits d'origine animale, la globalisation des échanges de ces produits et l'impact de multiples déterminants environnementaux, socioéconomiques et climatiques sur la santé humaine et la santé animale. Ces éléments de contexte amplifient les risques d'émergence, de diffusion et de maintien de maladies parasitaires et infectieuses animales et zoonotiques. C'est pourquoi, au travers de mesures d'adaptation, il s'agit d'accroître, au sein des territoires, la résilience des secteurs de l'élevage et de la santé face aux maladies climato-sensibles.

Cette adaptation passe par la priorisation des maladies, l'évaluation des risques, puis par des méthodes de réduction des risques (surveillance, prévention et contrôle), en s'appuyant sur une législation *ad hoc* et en œuvrant dans le contexte « d'une seule santé ». Toutes ces dimensions constituent le cœur des travaux d'AGIRs. L'unité aborde en particulier l'optimisation de la surveillance au travers de projets de recherche en Asie du Sud-Est et en Europe.

Contact : François Roger, francois.roger@cirad.fr

▲ *Paysage agricole dans le Haut Atlas occidental, Maroc.*
V. Simonneaux © IRD

Changement climatique *& systèmes de production agricole et d'élevage*

Le cinquième rapport du GIEC conclut sans équivoque au réchauffement de la planète, océans et continents, depuis 1950, et indique qu'il est « extrêmement probable » que l'influence de l'homme soit la cause principale de ce réchauffement observé. Les divers modèles d'évolution du climat utilisés par le GIEC, basés sur différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES), prévoient une amplification de ce réchauffement : si les émissions augmentent au même rythme que les années passées, on estime que la température moyenne mondiale augmentera entre 2,6 et 4,8°C au cours du XXIe siècle. Afin de prévenir les effets désastreux d'un tel scénario, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) s'est fixé comme objectif de contenir l'augmentation de la température en dessous de +2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Ceci requiert une réduction substantielle et durable des GES.

L'agriculture mondiale (culture et élevage) joue un double rôle dans ce tableau. D'un côté, elle contribue à près de 12 % des émissions globales de GES (près de 70 % des émissions de GES hors CO_2, notamment le méthane) et doit donc réduire ses propres émissions ; d'un autre côté, elle doit impérativement s'adapter aux changements climatiques.

Plusieurs enjeux rendent cette adaptation particulièrement délicate. En premier lieu, celle-ci ne doit pas se faire au détriment de la fonction de production. L'augmentation de la population mondiale, la persistance d'une population malnutrie et les récentes émeutes de la faim dans les pays les plus vulnérables, liées à la volatilité des prix agricoles, remettent sur le devant de la scène la question de la sécurité alimentaire et nutritionnelle. En second lieu, les variétés cultivées sont issues d'un long processus de domestication lié aux besoins humains et aux contraintes environnementales abiotiques (climat, sol) et biotiques (pollinisateurs, microorganismes symbiotes, bioagresseurs et maladies) : le changement rapide des conditions climatiques, notamment des régimes hydrique et thermique, peut fortement affecter l'ensemble de ces contraintes et créer des ruptures, hypothéquant toute capacité d'adaptation. Enfin, les moyens utilisables pour réguler la capacité de production, par exemple les ressources en eau pour l'irrigation ou les pesticides pour faire face aux nouvelles maladies, sont eux-mêmes affectés, objets d'utilisations concurrentielles, ou fortement contraints par d'autres enjeux comme la santé et la préservation de l'environnement.

Les défis actuels et futurs de la recherche sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique sont donc considérables : concevoir avec et pour les agriculteurs, tout particulièrement les plus pauvres et vulnérables d'entre eux, des solutions leur permettant de s'adapter aux changements climatiques, de réduire la part de l'agriculture dans les émissions de GES, tout en maintenant voire en accroissant leur production. Ces trois piliers sont au cœur du concept « d'agriculture climato-intelligente » *(climate smart agriculture)* développé par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) depuis 2010.

Les travaux présentés ci-après illustrent une partie de la diversité des recherches menées dans ce domaine par les unités membres d'Agropolis International : les processus génétiques et évolutifs impliqués dans l'adaptation des cultures et du bétail au changement climatique ; l'impact des systèmes de culture et d'élevage sur les émissions de GES ; la caractérisation, à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, de l'impact du changement climatique sur la production agricole ; l'analyse et le développement de la capacité d'adaptation au changement climatique de différents systèmes de culture et de production...

Les liens de ce chapitre « Changement climatique et systèmes de production agricole et d'élevage » avec les autres chapitres du présent dossier sont donc très étroits, tant du point de vue des ressources et du développement des territoires que de l'adaptation des plantes et des écosystèmes, ou encore de l'évolution des interactions entre organismes sous l'effet du changement climatique.

La recherche mondiale, réunie en mars 2015 à Montpellier dans le cadre de la conférence scientifique internationale *« Climate Smart Agriculture 2015 »* devra apporter sa contribution à ce débat et être en mesure de définir les fronts de science de cette agriculture qui doit faire face à des changements climatiques qui s'accélèrent. La question de la place de l'agriculture dans les conventions internationales, notamment au sein de la CCNUCC, pourrait ainsi se renforcer et trouver une concrétisation lors de la 21e conférence des parties (COP21) de cette convention, fin 2015 à Paris.

Jean-Luc Chotte (UMR Eco&Sols)
& Pascal Kosuth (Agropolis Fondation, LabEx Agro)

Changement climatique *& systèmes de production agricole et d'élevage*

Développer les recherches sur la plante d'intérêt agronomique, des gènes aux systèmes de production et de transformation, selon des enjeux liant société et agriculture

Le **LabEx Agro** « ***Agronomie et développement durable*** » (Programme Investissements d'Avenir 2011-2019), porté par **Agropolis Fondation**, rassemble un *continuum* de compétences pluridisciplinaires (sciences biologiques, sciences de l'ingénieur, sciences humaines et sociales). Il est porteur d'une expertise reconnue internationalement sur un grand nombre d'espèces végétales — tempérées, méditerranéennes et tropicales — et sur les systèmes de production et de transformation correspondants.

Les structures principales

LabEx Agro
Agronomie et développement durable
(Ciheam-IAMM/Cirad/CNRS/Inra/IRD/Irstea/Montpellier SupAgro/UAPV/UM/UPVD/UR)
1500 scientifiques

UMR Agap
Amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales
(Cirad/Inra/Montpellier SupAgro)
176 scientifiques

UMR DIADE
Diversité, adaptation et développement des plantes
(IRD/UM)
75 scientifiques

UMR Eco&Sols
Écologie fonctionnelle & biogéochimie des Sols & des agro-écosystèmes
(Inra/Cirad/IRD/Montpellier SupAgro)
60 scientifiques

UMR Innovation
Innovation et développement dans l'agriculture et l'agroalimentaire
(Inra/Cirad/Montpellier SupAgro)
58 scientifiques

UMR LEPSE
Laboratoire d'Écophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux
(Inra/Montpellier SupAgro)
15 scientifiques

UMR LISAH
Laboratoire d'étude des Interactions entre Sol – Agrosystème – Hydrosystème
(Inra/IRD/Montpellier SupAgro)
27 scientifiques

UMR B&PMP
Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes
(Inra/CNRS/Montpellier SupAgro/UM)
47 scientifiques

Suite p. 71

Ses objectifs sont de comprendre :
- le fonctionnement et l'écophysiologie de la plante : ses déterminants du gène aux cellules, tissus et organes ; les processus d'adaptation aux contraintes biotiques et abiotiques ;
- les processus de domestication des plantes cultivées, d'amélioration variétale et de gestion de l'agrobiodiversité ;
- le fonctionnement, l'évolution et l'adaptation des systèmes de culture et des systèmes de production en fonction des contextes climatiques, environnementaux, sociaux, techniques, économiques et réglementaires ;
- les processus de transformation et la qualité des produits alimentaires et non alimentaires qui en découlent ;
- l'organisation sociale autour de l'agriculture et ses enjeux de fourniture de produits, d'alimentation et santé des populations, de gestion des territoires et de l'environnement.

Il s'agit aussi de mobiliser ces connaissances au service de la société pour :
- l'optimisation de la production, l'amélioration variétale et la protection des cultures contre les maladies et bioagresseurs ;
- l'amélioration de la gestion des agro-écosystèmes sous contraintes et la maîtrise de leur impact sur les ressources, les milieux et la biodiversité ;
- l'amélioration de la qualité des produits ;
- la conception de politiques publiques agricoles et environnementales.

Le LabEx Agro regroupe 37 unités de recherche, 1500 cadres scientifiques et 800 personnels d'appui relevant de 12 institutions (**Inra, Cirad, Montpellier SupAgro, IRD, Université de Montpellier, Université de Perpignan, Université d'Avignon, Université de La Réunion, CNRS, Irstea, Ciheam-IAMM, AgroParisTech**). Il accueille 800 doctorants, post-doctorants et scientifiques étrangers.

Il est organisé en cinq domaines scientifiques étroitement articulés : (1) Génétique et génomique, écophysiologie et amélioration des plantes ; (2) Interactions plantes/microorganismes, maladies et ravageurs, écologie des populations et protection intégrée des cultures ; (3) Agro-écosystèmes, gestion des ressources, impacts sur les milieux innovations agri-environnementales; (4) Systèmes agro-alimentaires, transformation et qualité des produits alimentaires et non alimentaires ; (5) Interactions agriculture/société, processus d'innovation et gestion sociale de l'innovation.

Ses modes d'action sont :
- le soutien à l'animation de sa communauté scientifique ;
- le soutien aux projets de recherche et d'enseignement supérieur sur chacun de ces domaines scientifiques (fronts de recherche) ou sur des enjeux transverses mobilisant ces différents domaines (construction du phénotype des plantes de demain ; durabilité des systèmes de culture et de production ; transition agro-écologique ; approche intégrée de la qualité des produits ; évolution, adaptation, durabilité des systèmes agricoles et alimentaires...) ;
- le soutien au transfert des résultats de la recherche vers les acteurs économiques, notamment *via* des partenariats public-privé ;
- le renforcement de la visibilité internationale et de l'attractivité de la communauté du LabEx Agro.

▲ *Paysage cultivé aux Antilles.* © J.B. Charlier

Ingénierie des paysages cultivés pour une gestion durable des ressources en eau et sol

Le « ***Laboratoire d'étude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème*** » **(UMR LISAH – Inra, IRD, Montpellier SupAgro)** contribue à la production de connaissances à des fins d'ingénierie des paysages cultivés, pour une gestion durable des ressources en eau et en sol. Face aux changements globaux (variations climatiques, nouveaux besoins agricoles et alimentaires...), il s'agit de proposer :

- des modes de gestion des paysages cultivés en optimisant l'organisation spatiale des activités agricoles (occupation des terres, rotations culturales, pratiques d'entretien du sol et de traitement des cultures...) ;
- et des aménagements hydro-agricoles (réseaux de fossés, retenues collinaires, talus...).

Les recherches du LISAH ont pour objectifs :

- de développer les connaissances sur les transferts de masse et sur l'éco-dynamique des substances polluantes dans les sols et les bassins versants, en considérant leur organisation spatiale et temporelle (que celle-ci soit d'origine naturelle ou anthropique) ;
- d'élaborer des outils pour le diagnostic et la prévention des risques induits par les activités humaines, que ce soit sur les régimes hydrologiques ou sur l'évolution des ressources en eau et en sol dans les milieux cultivés ;
- de contribuer à la définition de nouveaux modes de gestion durable des paysages cultivés ;
- de former des étudiants aux concepts et aux outils d'analyse et de modélisation, en matière d'organisation de l'espace, du sol et de l'hydrologie des milieux cultivés.

Le LISAH gère l'Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau (OMERE) et développe la plateforme logicielle « OpenFLUID » de simulation des flux dans les paysages. Dans ce cadre, les recherches portent sur les paysages cultivés méditerranéens principalement, et, secondairement, sur les paysages cultivés tropicaux. Le laboratoire intervient pour ce faire dans les pays du Maghreb en s'appuyant sur un réseau de partenaires :

- en Tunisie : l'Institut National Agronomique de Tunisie, l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts et l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis ;
- au Maroc : l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV), l'Institut National de Recherche Agronomique marocain et l'École Nationale Forestière d'Ingénieurs.

Voir un exemple de projet conduit par l'UMR LISAH page 11. •••

Les structures principales

UMR Selmet
Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux
(Cirad/Inra/Montpellier SupAgro)
42 scientifiques

UMR System
Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens
(Cirad/Inra/Montpellier SupAgro/Ciheam-IAMM)
22 scientifiques

UR Aïda
Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles
(Cirad)
60 scientifiques

UR HortSys
Fonctionnement agroécologique et performances des systèmes de culture horticoles
(Cirad)
26 scientifiques

Pour des systèmes de culture multifonctionnels et écologiquement intensifs

L'**UMR** ***« Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens »*** **(System – Cirad, Inra, Montpellier SupAgro, Ciheam-IAMM)** explore les propriétés des systèmes de culture plurispécifiques. Elle identifie les marges de manœuvre permises par leur gestion pour produire de manière efficiente et durable les différents services écosystémiques que les sociétés attendent de l'agriculture.
Le champ de recherche de l'UMR System porte en particulier sur deux thématiques :

❶ Explorer les propriétés associées à la diversité végétale dans les systèmes de culture. Quand, dans un même espace, différentes espèces végétales (annuelles ou pérennes, herbacées ou ligneuses) sont associées, elles se trouvent en concurrence face aux ressources lumineuses et à celles du sol. Il s'agit de comprendre les modalités de cette compétition afin d'identifier les situations de facilitation permettant une productivité globale ou une éco-efficience élevées.

La structure et l'organisation spatiale de ces systèmes complexes déterminent non seulement l'accès aux ressources, mais également la fourniture des différents services environnementaux que sont la protection des sols et la dynamique de l'eau, la régulation des communautés d'organismes pathogènes, ravageurs et auxiliaires, ou encore la préservation de la biodiversité.

Lorsque que ce sont des espèces pérennes qui sont exploitées, les systèmes de culture sont installés sur des temps longs. L'unité s'intéresse à leur dynamique d'installation et d'évolution, ainsi qu'à l'impact de la diversité végétale sur la stabilité de leurs performances et sur leur résilience face au changement et aux aléas climatiques.

❷ Concevoir des systèmes de culture écologiquement intensifs et multifonctionnels. L'unité explore des scénarios d'évolution des systèmes de culture basés sur la diversification végétale. Ces scénarios font l'objet, en interaction avec les acteurs impliqués, d'évaluations multicritères à partir d'expérimentations et de simulations de prototypes.

Afin d'accompagner ces changements techniques, l'unité prend également en considération l'évolution des composantes biophysiques et techniques des systèmes de culture en transition. Elle travaille à la conception de systèmes de culture adaptatifs face aux aléas rencontrés. À l'échelle de l'exploitation agricole, l'unité étudie de quelle manière les choix stratégiques et les systèmes de culture évoluent et peuvent maintenir leurs performances dans un contexte de changements climatique, réglementaire et économique, ou encore de modification du cahier des charges (passage à l'agriculture biologique par exemple).

© C. Dupraz

▲ *Moisson de pois protéagineux en agroforesterie sur le domaine de Restinclières.*

Impact du développement de l'agroforesterie sur les émissions de gaz à effet de serre

Une étude réalisée en 2014 par l'Inra (pour le compte de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, et du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie) a estimé, en France, le potentiel d'atténuation des émissions de GES pour dix pratiques agricoles innovantes. L'agroforesterie (lignes d'arbres implantées dans des parcelles agricoles) était l'une d'elles.

L'analyse de la littérature bibliographique a conduit à retenir que, en 20 ans, le stockage de carbone dans la biomasse et dans le sol s'élève à 3,7 tonnes d'équivalent CO_2 par hectare et par an (t CO_2e/ha/an). Cette accumulation additionnelle de carbone provient du stockage dans la biomasse végétale pérenne (variable en fonction de ce que devient le bois produit) et de la restitution au sol de matières organiques. Cette étude prend également en compte les autres émissions de GES engendrées par l'introduction et la gestion d'arbres dans les parcelles agricoles, mais aussi le coût de ces opérations et ce qu'on appelle « l'assiette » (c'est-à-dire la surface agricole possiblement concernée).

Concernant l'agroforesterie, qui représente une profonde mutation pour les agriculteurs, deux hypothèses de diffusion lente (entre 4 et 10 % de l'assiette d'ici 2030) ont été envisagées. L'analyse montre qu'il est possible d'introduire des arbres dans les parcelles tout en conservant le niveau de production agricole français. Sous ces hypothèses, l'étude conclut qu'à l'horizon 2030, l'agroforesterie pourrait, en France, permettre de réduire les stockages en carbone de 1,5 million de t CO_2e, le tout pour un coût approximatif de 14 euros par tonne de CO_2e. Il s'agit là d'un coût modéré par rapport aux autres actions envisagées dans l'étude, et cela place l'agroforesterie parmi les pratiques agricoles à promouvoir politiquement pour les multiples services environnementaux qu'elle peut rendre.

Contact : Aurélie Metay, aurelie.metay@supagro.fr

Pour plus d'informations : www6.paris.inra.fr/depe/Actualites/GES

▲ *Vergers de manguiers en fleur à la Réunion*

© UR HortSys

L'agroécologie pour une horticulture tropicale innovante et durable

L'objectif principal de l'**UR** ***« Fonctionnement agroécologique et performances des systèmes de culture horticoles »*** **(HortSys – Cirad)** est de développer les bases scientifiques d'une agroécologie des systèmes horticoles (c'est-à-dire reposant sur les principes d'une intensification écologique) et de contribuer à la conception de systèmes de culture horticoles innovants et durables.

L'objet d'étude privilégié d'HortSys est le système de culture appliqué aux productions horticoles tropicales. Son ambition est de contribuer significativement aux recherches cognitives en agro-écologie ainsi qu'au développement d'une horticulture tropicale durable. Concrètement, il s'agit de concevoir de nouveaux systèmes qui soient à la fois adaptés au changement climatique et écologiquement innovants, tout en mettant en œuvre, au Sud, des processus d'accompagnement et de formation de partenaires dans ce domaine.

Afin de formaliser ses recherches sur les systèmes de culture, HortSys a structuré son questionnement scientifique autour de deux axes distincts mais complémentaires : i) le fonctionnement agro-écologique des systèmes horticoles, ii) l'évaluation et la conception de systèmes horticoles répondant aux nouveaux enjeux économiques, écologiques et sanitaires.

L'unité est en conséquence organisée en deux équipes de recherche :

- Les disciplines étudiées par l'équipe « Fonctionnement agro-écologique, interactions et régulations biologiques dans les systèmes horticoles » sont notamment l'agronomie, l'écophysiologie, l'écologie, l'entomologie et la phytopathologie. L'équipe s'appuie sur des systèmes modèles représentatifs (partagés avec l'autre équipe) pour traiter de situations exemplaires et contrastées au plan des enjeux économiques et scientifiques : les vergers de manguiers en Afrique de l'Ouest et à La Réunion ; les vergers d'agrumes en Afrique de l'Ouest et en Martinique ; les périmètres maraîchers au Bénin, au Kenya, au Sénégal et en Martinique.

  L'hypothèse centrale de ce travail repose sur l'idée que certaines modalités d'augmentation de la biodiversité végétale dans les agro-écosystèmes peuvent conduire à la régulation naturelle de bioagresseurs (telluriques comme aériens). L'objectif global de l'équipe est de mieux comprendre les mécanismes en jeu pour expliquer, prévoir et quantifier les effets des interactions entre biodiversité et plantes cultivées afin de mieux contrôler les bioagresseurs et de favoriser la fourniture de services écosystémiques associés.

- Les disciplines étudiées par l'équipe « Évaluation et conception de systèmes de culture horticoles durables » sont l'agronomie systémique principalement, mais aussi l'évaluation environnementale et l'économie. Les systèmes horticoles sont complexes et variés et ont des impacts importants tant dans le domaine environnemental (utilisation fréquente de pesticides) que socioéconomique (ces activités représentant une forte valeur ajoutée). L'objectif global de l'équipe est de concevoir et de mettre au point des méthodes d'évaluation locales et globales (analyses de cycles de vie – ACV) des systèmes, ainsi que des méthodes facilitant la conception de systèmes de culture écologiquement innovants (réduction de l'usage de pesticides, régulation biologique, gestion optimisée de la biodiversité). L'écoconception nécessite l'évaluation des performances agronomiques, environnementales, économiques et sociales des systèmes, et représente donc un défi méthodologique aussi bien que scientifique.

Voir un exemple de projet conduit par l'UR HortSys page 59. •••

La télédétection pour prévoir les rendements et analyser l'impact des scénarios climatiques sur la production agricole

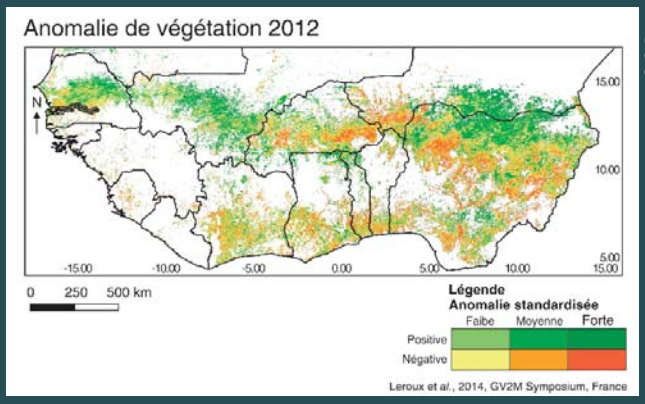
Caractériser l'impact du changement climatique, distinguer ses effets de ceux de la variabilité climatique requiert de combiner des données, des connaissances, des outils et des méthodes faisant appel à de nombreuses disciplines scientifiques : météorologie, climatologie (modèles climatiques globaux et régionaux), télédétection, modélisation, statistiques agricoles. La difficulté est que ces différentes informations ont été obtenues à des échelles spatio-temporelles très éloignées : de la parcelle à la région, de la journée à l'année.
Or l'échelle de travail, la variabilité spatio-temporelle et les paramétrages ont des influences très fortes sur la qualité prédictive des modèles climatiques. Par exemple, au Sénégal, les moyennes de rendements interannuels simulés par le modèle de culture SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques Version H), en utilisant les données générées par neuf modèles climatiques régionaux, présentent des biais importants (de 200 à 700 kg/ha).

Ces données sont à comparer à la moyenne de 600 kg/ha, obtenue en utilisant les données du réseau de stations au sol. Néanmoins, le modèle SARRA-H identifie clairement les grandes tendances de l'impact de l'augmentation de la température sur les rendements. Ainsi, à l'échelle de la zone soudano-sahélienne, au-delà d'une augmentation de température de 2 degrés, il apparaît qu'un accroissement des pluies ne pourra empêcher une baisse des rendements, les variétés photopériodiques présentant une meilleure capacité d'adaptation à ces changements.

Pour mieux documenter ces variabilités, les chercheurs de l'UMR TETIS *(voir page 21)* travaillent à une meilleure combinaison des échelles temporelles et spatiales en recherchant la cohérence entre les indicateurs issus de l'imagerie satellitaire et ceux obtenus par la modélisation. À titre d'exemple, ils développent des cartes nationales et régionales caractérisant les systèmes de culture et identifiant des anomalies de production végétale en lien avec des stress subis par les cultures. S'appuyant sur des images satellites objectives, répétitives et exhaustives, l'ambition de ces travaux est de caractériser les variabilités spatio-temporelles (domaine cultivé, système de culture, phénologie, biomasse...) afin de proposer des descripteurs permettant de paramétrer les modèles utilisés pour la prévision des rendements et l'analyse de l'impact des scénarios climatiques sur la production agricole. Ces travaux s'appuient sur plusieurs projets (Programme National de Télédétection Spatiale ; Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine ; *Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project* ou « Projet d'intercomparaison et d'amélioration des modèles de simulation de cultures ») et un grand nombre d'instituts et de partenaires (Cirad, CNRS, Inra, IRD, Centre National d'Études Spatiales, AGRHYMET, Embrapa…).

Contacts : Christian Baron, christian.baron@cirad.fr
Agnès Bégué, agnes.begue@teledetection.fr
Élodie Vintrou, elodie.vintrou@gmail.com
Louise Leroux, louise.leroux@cirad.fr

Pour plus d'informations : http://sarra-h.teledetection.fr



© C. Baron

▲ *Les données satellites donnent des informations à grande échelle sur la couverture végétale et son évolution dans le temps, par rapport à des périodes de référence.*

Intensification durable des cultures annuelles en milieu tropical contraint

L'**UR** ***« Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles »*** **(Aïda – Cirad)** s'emploie à intensifier, de manière durable, la production des cultures annuelles en milieu tropical particulièrement contraint.

Ses recherches visent la pleine valorisation des ressources disponibles. Pour ce faire, les équipes d'Aïda s'efforcent de mobiliser les processus écologiques des agrosystèmes. Elles utilisent alors toutes les composantes techniques et toutes les disciplines dont elles disposent, depuis la gestion intégrée des ressources trophiques jusqu'à la lutte contre les bio-agresseurs, en passant par l'étude et la valorisation de la variabilité génétique des plantes cultivées.

L'UR développe une large gamme de méthodes et d'outils d'évaluation (tels que la modélisation ou l'analyse de l'information spatiale) pour différentes finalités, différents interlocuteurs et à différentes échelles.

Dans cette optique, elle propose par exemple des systèmes innovants et des options techniques concrètes qui pourront être co-conçus puis adaptés avec les producteurs et les acteurs locaux (systèmes de culture en agriculture de conservation, technique de gestion des ravageurs du coton et de la canne à sucre).

L'UR Aïda ambitionne par ailleurs de documenter de grands enjeux sociétaux et d'alimenter les débats liés à la sécurité alimentaire, aux grands bilans agronomiques et environnementaux (stockage du carbone, ressources en eau, disponibilité des minéraux) et aux interactions des agro-écosystèmes avec la biodiversité et le changement climatique.

Voir un exemple de projet conduit par l'UR Aïda page 18.

▲ *Productrice de coton au Burkina Faso.*
K. Naudin © Cirad

▲ *Région de El Hammam (Égypte) : culture et pâturage de plantes fourragères (bersim en hiver et maïs en été) sur les nouvelles terres irriguées par le canal El Nars.*

V. Alary © Cirad

Intensification écologique des systèmes d'élevage

L'**UMR « *Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux* » (Selmet – Cirad, Inra, Montpellier SupAgro)** conçoit des conduites alternatives qui répondent aux enjeux de l'intensification écologique des agro-écosystèmes tout en maintenant — voire en améliorant — leurs capacités à fournir les services écosystémiques que les sociétés attendent de l'élevage des animaux.

Pour ce faire, l'unité se fixe trois objectifs :

- Analyser et comprendre les changements des agro-écosystèmes d'élevage et leurs contextes : face aux contraintes multiples et de plus en plus fortes qu'ils subissent, ces agro-écosystèmes peuvent montrer des capacités d'adaptation, ou au contraire décliner et laisser la place à d'autres activités et d'autres modes de vie. Il s'agit donc d'analyser leurs trajectoires de développement, qui peuvent également être orientées par certaines opportunités, le plus souvent économiques.
- Évaluer, dans leurs environnements biophysiques et biotechniques, le potentiel de production des ressources animales et végétales, en fonction des opportunités et des contraintes, afin d'établir des diagnostics et de concevoir des innovations sur les agro-écosystèmes d'élevage. Cette évaluation se base sur des référentiels.
- Concevoir, avec l'ensemble des acteurs concernés, des systèmes plus efficients dans un contexte où les systèmes d'élevage sont toujours plus contraints par leurs environnements. Il s'agit de définir des stratégies de développement durables aux plans social, économique et environnemental et qui soient compatibles avec un objectif de transition écologique de l'agriculture. •••

Futur des systèmes d'élevage méditerranéens

Les systèmes d'élevage de la région méditerranéenne doivent s'adapter à des changements à la fois multiples et complexes liés à l'histoire passée et présente de la région. Le projet CLIMED, mené par l'UMR Selmet et associant le Cirad, l'Inra, l'IRD, l'*Agricultural Research Center* (Égypte) et l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (Maroc), vise à comprendre et à évaluer la viabilité technique, économique et socio-écologique des systèmes intégrés « agriculture-élevage » dans le contexte méditerranéen.

L'enjeu est double ; il convient à la fois :

- d'aider les agriculteurs, les collectivités locales, les chercheurs et les décideurs politiques à mieux comprendre et prévoir les évolutions futures de l'élevage en Méditerranée ;
- de définir des priorités, des règles et des politiques mieux à même d'appréhender les questions socio-environnementales en lien avec la pression démographique et foncière, avec l'augmentation de la demande et avec l'évolution de la concurrence internationale.

Ainsi, les principaux objectifs du projet CLIMED sont :

❶ l'identification et la compréhension des systèmes « agriculture-élevage » pour un meilleur usage des ressources (eau, sol, résidus de récolte, fourrages des parcours...) et une plus grande efficacité socioéconomique (amplification de la production afin de répondre à la demande croissante de produits animaux de qualité) ;

❷ l'évaluation des capacités d'adaptation de ces systèmes, ainsi que de leur degré de vulnérabilité et de flexibilité face aux contraintes et changements actuels ;

❸ l'évaluation de la coviabilité socio-écologique et de la résilience de ces systèmes à l'égard de la croissance démographique et dans une perspective historique ;

❹ l'élaboration de scénarios futurs et la formulation de priorités pour le développement de l'élevage dans le contexte méditerranéen, de manière à accroître les capacités d'adaptation de ces systèmes.

Le projet permettra également — *via* le partage des méthodes de recherche et de bases de données — de renforcer la collaboration interdisciplinaire entre les différentes équipes issues de plusieurs pays méditerranéens.

Contact : Véronique Alary, veronique.alary@cirad.fr

Projet LACCAVE : adaptation au changement climatique pour la vigne et le vin

▲ *Chercheurs et viticulteurs travaillent sur l'adaptation des vignobles au changement climatique, ici à Banyuls.*

© E. Delay

Le projet LACCAVE vise à étudier les impacts du changement climatique sur la vigne et le vin et les stratégies d'adaptation possibles pour les régions viticoles françaises. Il développe un cadre global d'analyse de la filière vin, permettant d'étudier à la fois les impacts du changement climatique (avancée des dates de vendange, stress hydriques plus marqués, vins plus alcoolisés et moins acides...) et la diversité des leviers d'adaptation possibles. Cette analyse s'effectue à plusieurs échelles (plante, parcelle, exploitation, vignoble régional et secteur) avec une attention particulière aux niveaux régionaux où se différencient les impacts climatiques et peuvent se coordonner les stratégies d'adaptation.

Coordonné par les UMR Innovation à Montpellier et « Écophysiologie et génomique fonctionnelle de la vigne » à Bordeaux (EGFV – Inra, Université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro), le projet réunit 21 unités de recherche de l'Inra, dont 8 localisées à Montpellier. Les opérations sont multiples : bilan des connaissances sur l'évolution du climat à l'échelle des vignobles et ses effets sur la vigne et le vin ; étude des bases physiologiques et génétiques des réponses de la vigne aux paramètres du changement climatique ; analyse des innovations qui peuvent contribuer à l'adaptation et des conditions de leur mise en œuvre à l'échelle locale ; étude des coûts de l'adaptation mais aussi des consentements à payer de la part des consommateurs pour des vins préfigurant les effets du changement climatique... Ces travaux alimentent un exercice de prospective, conduit avec FranceAgrimer, qui explore les scénarios d'adaptation pour les régions viticoles françaises.

Contact : Jean-Marc Touzard, touzard@supagro.inra.fr

Pour plus d'informations : www.accaf.inra.fr/Actions-et-Projets/adaptation_productions_vegetales/LACCAVE/

Changement de pratiques et innovations agricoles et agroalimentaires

L'**UMR *« Innovation et développement dans l'agriculture et l'agroalimentaire »* (Innovation – Inra, Cirad, Montpellier SupAgro)** développe des travaux de recherche pluridisciplinaires, en France et à l'international, sur les processus d'innovation dans l'agriculture et l'agroalimentaire, pour faire face aux enjeux de transition agro-écologique et d'adaptation au changement climatique.

Ses recherches s'intéressent à l'ensemble des processus liés aux actions d'adaptation, depuis l'analyse des motivations et des objectifs des acteurs en matière d'innovation, en passant par les dispositions concrètes de mise en œuvre des changements, jusqu'aux effets de développement induits par ces transformations. Les travaux se focalisent principalement sur les changements de pratiques et les innovations « en train de se faire » : elles représentent en effet des leviers possibles d'adaptation au changement climatique pour le futur. Ces travaux mettent en particulier l'accent sur le rôle de la recherche et sur le renforcement des capacités des producteurs face à ces enjeux.

L'UMR regroupe des compétences en agronomie et en sciences sociales avec, comme objets d'étude, les plantes pérennes (vigne, cacao, café, lavandin...) et les systèmes de culture annuelle (riz, céréales, coton...).

Ses recherches peuvent porter sur des pratiques actuelles tenant compte de la variabilité climatique, ou encore s'orienter sur la nécessité de limiter les impacts du changement climatique (effets sur les rendements et sur la qualité des produits). Elles contribuent ainsi directement à différents travaux de prospective sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique.

Co-conception de systèmes de production climato-intelligents

Les travaux sur l'agriculture climato-intelligente visent à explorer des changements institutionnels (nouveaux services d'appui, nouveaux arrangements entre acteurs…), des pratiques innovantes (usage de l'information agro-climatique, irrigation de précision…) ou des pratiques agro-écologiques promues depuis longtemps (utilisation du compost, associations de cultures…), tout en les évaluant selon des critères de sécurité alimentaire, d'adaptation et d'atténuation des GES. Ces travaux menés par l'UMR Innovation dans différents pays (Burkina Faso, Colombie, France) s'inscrivent dans des démarches participatives associant les agriculteurs. Ils ont pour but de co-concevoir des stratégies innovantes tout en simulant leurs effets à court et long termes selon les critères de l'agriculture climato-intelligente. Ces simulations sont associées à des expérimentations en grandeur réelle qui aident les producteurs à mieux s'approprier les solutions à disposition et leurs modalités de mise en œuvre.

Ces recherches, conduites au Cirad en collaboration avec le CIAT (Centre international d'agriculture tropicale, Colombie), contribuent à l'élaboration de nouvelles méthodes d'accompagnement des agriculteurs. Elles permettent de former les conseillers des institutions publiques et privées aux incertitudes qui existent, à court et long termes, et à l'exploration des futurs possibles *via* l'usage d'outils de simulation.

Contact : Nadine Andrieu, nadine.andrieu@cirad.fr

Projet MACACC : faire tester aux producteurs des scénarios de gestion adaptative

L'objectif général du projet MACACC (Modélisation pour l'accompagnement des ACteurs, vers l'Adaptation des Couverts pérennes ou agroforestiers aux Changements globaux) est de définir différents scénarios de gestion adaptative et de tester la capacité des producteurs à les adopter. Trois plantations pérennes ont été choisies comme études de cas, en raison de leur importance économique, de leur origine (zone tropicale ou tempérée) et de leur structure (mono ou multicouches, culture principale en premier ou second étage) : l'eucalyptus au Brésil, le café au Costa Rica et le pin maritime en France. Si les effets du changement climatique sur l'agriculture font déjà l'objet d'une littérature importante, d'autres problématiques restent encore peu investies en économie agricole.

C'est le cas notamment de l'évaluation de la capacité d'adaptation du système agricole à l'évolution du climat. Les économistes participant au projet des UMR LAMETA *(voir page 25)* et MOISA (« Marchés, Organisations, Institutions et Stratégies d'Acteurs ») étudient ces problématiques en mobilisant les outils standards de la modélisation théorique ainsi que les développements récents de l'économie expérimentale et de l'analyse microéconométrique. L'évaluation de la durabilité des stratégies d'adaptation doit prendre en compte les interactions et rétroactions entre la croissance des cultures, la disponibilité des ressources et les facteurs économiques à l'échelle de l'exploitation. Cela nécessite l'utilisation de modèles qui simulent les règles de décision des agriculteurs en vue d'étudier les stratégies d'adaptation possibles aux changements environnementaux.

Il existe de nombreux cas où la production de services écosystémiques est bénéfique pour l'adaptation. Par exemple, les plantations de café d'ombre fournissent divers services écologiques comme une biodiversité accrue, la protection des sols, la lutte contre l'érosion et la séquestration du carbone. Cette production de biens publics légitime le recours à des incitations financières externes afin de promouvoir l'adoption des pratiques d'adaptation. Il existe déjà une variété de systèmes susceptibles de pousser les producteurs vers une stratégie d'adaptation au changement climatique tels que, par exemple, le paiement pour services environnementaux. Dans ce cas, la production de services environnementaux est intégrée dans un contexte social, économique et institutionnel complexe. Il est alors nécessaire d'analyser les facteurs déterminants de la participation des producteurs dans ces initiatives de conservation/adaptation. C'est pour cette raison que les économistes du LAMETA et de MOISA cherchent à mettre en évidence l'hétérogénéité des préférences des producteurs pour les différents attributs des contrats offerts dans le cadre de paiements pour services environnementaux. Ce type de travaux fournit des indications sur la façon dont les initiatives de conservation peuvent être efficacement mises en œuvre.

▲ *Plants de caféiers à l'ombre d'arbres de l'espèce* **Erythrina poeppigiana.** B. Rapidel © Cirad

Contact : Julie Subervie, subervie@supagro.inra.fr

Pour plus d'informations : https://sites.google.com/site/macacccostarica/home

Processus écologiques des sols : rôle des plantes et des organismes du sol vis-à-vis des flux de carbone et de nutriments

L'**UMR *« Écologie fonctionnelle et biogéochimie des Sols et des agrosystèmes »* (Eco&Sols – Inra, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro)** est présente en Europe (Montpellier, France), en Afrique (Sénégal, Burkina Faso, Congo, Kenya, Madagascar), en Amérique du Sud (Costa Rica, Brésil) et en Asie du Sud-Est (Thaïlande).

Eco&Sols mène des recherches dans une démarche d'écologie fonctionnelle et se pose la question du rôle des plantes et des organismes du sol (racines, faune du sol et microorganismes) sur les flux couplés du carbone et des nutriments (principalement de l'azote et du phosphore) dans les sols et les agro-écosystèmes. Les terrains de recherche méditerranéens et tropicaux peuvent être des agro-écosystèmes, des plantations de ligneux pérennes, des zones agroforestières ou des cultures annuelles. Différentes pratiques agronomiques sont testées, telles que les cultures associées (graminées/légumineuses, mélange de génotypes, plantations mixtes), les cultures à faibles niveaux d'intrants ou l'agriculture biologique.

Cette approche est développée dans le cadre des changements d'usage des sols et des changements climatiques.
La finalité des recherches à Eco&Sols est de proposer des pratiques dédiées au maintien et à l'amélioration des fonctions agricoles et environnementales des agro-écosystèmes dans un environnement changeant (climat, changements d'usage des sols).

La conception de pratiques agronomiques capables de promouvoir les processus écologiques nécessite une amélioration des connaissances du fonctionnement biologique du sol, et, en particulier :

- du rôle des organismes (bactéries, champignons, microorganismes rhizosphériques, microfaune, macrofaune), de leurs interactions trophiques ou non trophiques sur la dynamique des nutriments (N, P) dans les sols et sur la biodisponibilité de ces nutriments pour les plantes ;
- des processus biogéochimiques déterminant l'efficience d'acquisition, d'utilisation et de recyclage des nutriments (N, P) dans les agro-écosystèmes à bas niveaux d'intrants ;
- des facteurs et processus majeurs de la production et de la séquestration du carbone au sein des agro-écosystèmes.

Plusieurs types d'usages et de modes de gestion des terres sont ainsi évalués et modélisés pour leur productivité, les services écosystémiques qu'ils fournissent et leur vulnérabilité face aux changements globaux. •••

Voir un exemple de projet conduit par l'UMR Eco&Sols page 38.

Amélioration génétique des plantes méditerranéennes et tropicales

L'**UMR « *Amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales* » (Agap – Cirad, Inra, Montpellier SupAgro)** fédère un large éventail de compétences pour constituer un pôle d'envergure en biologie, écophysiologie et génétique végétales finalisées, associant des agents de ses organismes tutelles, de l'Institut français de la vigne et du vin et du Conservatoire botanique national méditerranéen de Porquerolles.

▲ *Variétés de riz étudiées en laboratoire au Cirad à Montpellier dans le cadre des biotechnologies et ressources génétiques végétales.*

J.C. Glaszmann © Cirad

Dans un environnement global en mutation rapide, la capacité à produire du matériel végétal adapté à des conditions agronomiques diverses et changeantes, ainsi qu'à des besoins nouveaux, est une priorité absolue. La génomique, l'informatique et la modélisation mathématique ouvrent des voies nouvelles pour étudier les relations entre diversité génétique, comportement agronomique et réponse à la sélection.

Agap œuvre en faveur de la création de matériel végétal adapté aux systèmes de production, notamment en prenant en compte les évolutions liées au changement climatique. Les recherches de l'unité se concentrent sur une vingtaine d'espèces végétales tropicales et méditerranéennes avec quatre objectifs scientifiques :

- la compréhension des facteurs du développement et de l'adaptation des plantes aux contraintes environnementales ;
- la caractérisation et la compréhension de l'organisation et de la diversité des génomes ;
- l'étude et la gestion de l'agrobiodiversité et des données afférentes prenant en compte différentes échelles biologiques, éco-géographiques, spatio-temporelles et les sociétés ;
- l'acquisition et la mobilisation des connaissances en vue de la définition d'idéotypes et de la création de matériel végétal innovant.

L'unité est structurée en trois domaines thématiques :

- Diversité et génomes, domestication, environnements, sociétés : étudier la réponse des populations aux contraintes environnementales et comprendre la dynamique évolutive de l'agrobiodiversité dans le temps et dans l'espace permet de mieux définir les stratégies de gestion de la diversité ; la compréhension de l'organisation et de la diversité des génomes permet, quant à elle, d'aborder leur impact sur la transmission et l'expression des gènes et des caractères d'intérêt.
- Fonctionnement des plantes et peuplements : dans un contexte de changement climatique et de contraintes environnementales, il s'agit de mettre en évidence et de disséquer le contrôle physiologique, moléculaire, génétique, épigénétique et environnemental de traits d'intérêt et, plus particulièrement, les mécanismes d'adaptation aux contraintes abiotiques et biotiques.
- Approches intégratives pour l'innovation variétale : les avancées de la biologie intégrative, la disponibilité croissante de données « haut débit » et des outils de simulation ouvrent de nouvelles perspectives pour la définition des idéotypes et pour optimiser les schémas de création de matériel végétal innovant, conciliant résistance aux stress et qualité des produits.

L'adaptation des plantes aux changements climatiques : étude des mécanismes génétiques et évolutifs impliqués dans les changements phénologiques

Il est aujourd'hui avéré que les changements climatiques affectent de nombreux processus biologiques et écologiques, leurs conséquences allant d'importants changements de phénologie jusqu'à des modifications de l'aire de répartition des espèces. Comprendre et prédire l'impact des changements climatiques sur la diversité génétique et phénotypique des plantes cultivées et des formes sauvages qui leur sont apparentées sont des enjeux majeurs, notamment pour les pays en développement où les populations humaines comptent principalement sur des systèmes de cultures pluviaux traditionnels.

Avancer sur ces questions nécessite de bien connaître l'architecture génétique des traits adaptatifs mais aussi de décrypter la/les trajectoires adaptives des populations naturelles et artificielles soumis à des environnements changeants.

Pour atteindre ces objectifs, l'UMR Agap s'appuie sur les méthodes d'analyse haut-débit du polymorphisme nucléotidique et étudie les relations génotype/phénotype et génotype/climat des populations d'origine pour repérer des régions du génome impliquées dans la réponse des plantes à l'hétérogénéité du climat. Les travaux de l'unité comportent des analyses méthodologiques dans le domaine de la génomique des populations et des approches expérimentales sur quatre espèces : deux espèces de riz (*Oriza sativa* et *Oriza glaberima*), le mil *(Pennisetum glaucum)* et *Medicago truncatula*, espèce modèle pour la génétique et la génomique des légumineuses. Parce qu'il constitue un caractère clé de la valeur adaptative d'une plante et de son rendement grainier et qu'il dépend des conditions climatiques, le caractère adaptatif cible étudié est la date de floraison.

La diversité étudiée couvre des gradients climatiques spatiaux (aire de distribution de l'espèce) et temporels (suivi et échantillonnage au cours du temps d'un même site). Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet ARCAD et sont réalisés en étroite collaboration avec l'UMR DIADE.

Contact : Joëlle Ronfort, joelle.ronfort@supagro.inra.fr

Adaptation du mil à la sécheresse

Le mil et le sorgho sont deux céréales très cultivées dans les zones sèches du Sahel. Or, depuis les années 1970, ces régions ont connu une série de périodes de sécheresse. Comment ces variétés cultivées se sont-elles adaptées et quels gènes sont associés à ces adaptations ? Le projet *« Agropolis Ressource Center for Crop Conservation and Adaptation »* (ARCAD) cherche à répondre à ces deux questions, dans le cadre d'une collaboration entre les UMR DIADE, Agap et l'université Abdou Moumouni de Niamey. Il a, pour ce faire, bénéficié de financements émanant de l'ANR et de la Fondation Agropolis.

Ces études ont pu démontrer l'évolution des variétés de mil à l'échelle du Niger entre 1976 et 2003, à partir d'expérimentations en champs échantillonnant ces deux périodes. En effet, sur ces périodes, il s'est opéré une sélection spontanée d'un allèle du gène Phytochrome C, l'un des gènes de variation contrôlant le cycle du mil. Ces résultats apportent des solutions directes d'autant plus précieuses que les prévisions actuelles évaluent que la saison pluvieuse au Sahel devrait, dans le futur, se réduire de 10 à 20 %. Ainsi, la compréhension des mécanismes naturels d'adaptation génétique peut permettre, comme ici, d'identifier des stratégies d'adaptation aux climats futurs.

Contact : Yves Vigouroux, yves.vigouroux@ird.fr

© Projet ARCAD

▲ *La grande diversité des variétés de mil est un atout pour l'adaptation de la plante à la variabilité du climat au Niger.*

▼ *Parcelle de caféiers à La Réunion où l'UMR DIADE étudie l'influence du climat sur le développement de la graine et la qualité du café.*

© UMR DIADE

La génomique au service d'une meilleure adaptation des plantes cultivées à leur milieu

Les recherches de l'**UMR *« Diversité, adaptation et développement des plantes »* (DIADE – IRD, UM)** visent à comprendre la nature et le rôle des mécanismes de diversification structurale et fonctionnelle (i) du génome des plantes tropicales et (ii) de leurs populations, au cours des processus de spéciation et d'adaptation aux variations naturelles du milieu ou aux modifications d'origine anthropique.

Les recherches font principalement appel à des compétences en génétique, épigénétique, biologie du développement, physiologie, systématique et évolution. Lorsque les projets collaboratifs le nécessitent, elles intègrent aussi d'autres approches telles que la modélisation, la télédétection ou l'écologie.

Les études de l'unité s'appuient généralement sur la confrontation de plantes modèles (riz, *Arabidopsis*, tomate, peuplier) et d'espèces d'intérêt agronomique ou écologique (caféiers, filaos, ignames, maïs, palmiers, mils). Différents niveaux d'analyse, de la cellule au complexe d'espèces, sont considérés. Ainsi, l'UMR DIADE aborde :

❶ la régulation fine de l'expression de gènes clés du développement ;
❷ le contrôle des transitions développementales ;
❸ l'histoire évolutive de familles de gènes ;
❹ les déterminants moléculaires (gènes ou réseaux de gènes) de la variation phénotypique de caractères d'intérêt agronomique ou écologique ;
❺ la dynamique et la plasticité des génomes mais aussi la dynamique et la diversité des populations, en réponse à des facteurs écologiques et humains (structuration de la diversité génétique, adaptation aux changements du milieu, domestication) ou biologiques (chocs génomiques).

Ces recherches relèvent de la biologie fonctionnelle et évolutive et intègrent les outils et concepts de la génomique moderne. Ceux-ci ont radicalement modifié la connaissance scientifique du fonctionnement des génomes et des mécanismes de l'hérédité, mais aussi la manière dont on apprécie désormais la contribution du génotype au phénotype. •••

Des modèles pour adapter la conduite des cultures au changement climatique

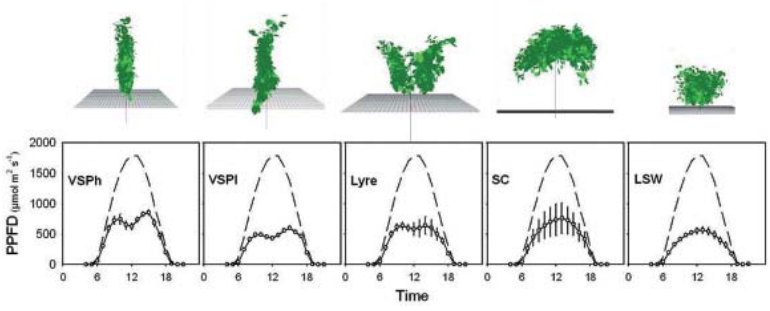
Analyser la conduite des cultures et concevoir les évolutions permettant de les adapter au changement climatique posent des problèmes expérimentaux difficiles à contourner, en particulier pour les canopées complexes et de grand développement. C'est le cas de la vigne pour laquelle de très nombreux modes de conduite traditionnels pourraient être progressivement remplacés par des systèmes mieux adaptés aux conditions climatiques futures. Cette évolution nécessite de réévaluer les concepts sur lesquels s'appuient les pratiques actuelles en y intégrant les effets des contraintes thermiques et hydriques dès la conception des systèmes.

Pour répondre à cette problématique, une équipe du LEPSE a couplé plusieurs modèles : l'un reconstruit la structure du couvert de la vigne, un autre distribue le rayonnement dans cette architecture, et un dernier prédit l'adaptation des capacités photosynthétiques des feuilles en fonction de leur microenvironnement lumineux. Cette chaine de calcul simule, de manière dynamique, l'assimilation carbonée et la transpiration foliaire en fonction du microclimat local perçu par les feuilles.

Les paramètres ont été ajustés au vignoble pour différentes architectures de couvert dans de grandes chambres d'assimilation. Les simulations ont été réalisées pour une gamme contrastée de modes de conduite et elles confirment que les performances photosynthétiques globales sont étroitement liées à la quantité de rayonnement absorbé. Elles mettent ainsi en évidence et quantifient pour la première fois le rôle déterminant du taux d'auto-ombrage des différentes structures de couverts sur l'efficience d'utilisation de l'eau. Cette démarche permettra de tester *in silico* les combinaisons cépage-mode de conduite les mieux adaptées aux scénarios climatiques futurs attendus dans les différents terroirs viticoles.

Cette étude est le fruit d'une collaboration entre des scientifiques français (unité expérimentale du domaine de Pech-Rouge à Gruissan, Inra) et argentins (*Estación experimental agropecuaria* de l'*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* — INTA).

Contact : Éric Lebon, eric.lebon@supagro.inra.fr



▶ ***Simulation de la quantité de rayonnement intercepté par différents modes de conduite de la vigne au cours d'une journée ensoleillée.***

*Espalier étroit (VSPh), espalier large (VSPl), Lyre, rideau simple (SC), cordon libre (LSW). PPFD (*photosynthetic photon flux density, *ou « densité de photons utiles pour la photosynthèse ») : quantité de rayonnement solaire au-dessus de la culture (tirets) et quantité interceptée par les plantes (traits pleins) en fonction de l'heure solaire (*Time*).*

Réponses physiologiques des plantes à la sécheresse et aux fortes températures : identifier les variétés adaptées face au changement climatique

Le *« **Laboratoire d'Écophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux** »* **(UMR LEPSE – Inra, Montpellier SupAgro)** a pour mission principale d'aider à trouver les variétés les plus tolérantes aux stress, et les plus efficaces et les plus économes pour l'agriculture de demain. Son travail consiste à analyser et modéliser la variabilité génétique des réponses des plantes à des conditions environnementales contrastées, notamment la sécheresse et les températures élevées. Les connaissances acquises avec ces recherches sont intégrées dans des modèles embarquant la variabilité génétique et environnementale pour prévoir le comportement des génotypes et des espèces dans des climats actuels ou futurs.

Au sein du LEPSE, l'équipe « Stress environnementaux et processus intégrés » cherche à identifier les déterminants de la capacité d'adaptation des plantes aux contraintes hydriques et thermiques. Elle teste ses hypothèses sur l'espèce modèle *Arabidopsis thaliana* — dont la variabilité génétique naturelle ou artificielle est importante et caractérisée au plan moléculaire — en combinant, avec la modélisation, des approches d'écophysiologie, de génétique quantitative, de physiologie et de biologie moléculaire.

L'équipe « Efficience de transpiration et adaptation des plantes aux climats secs » cherche pour sa part à identifier des leviers d'action génétiques et agronomiques permettant d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau dans les systèmes viticoles soumis aux contraintes abiotiques. La variabilité génétique de la tolérance à la sécheresse et aux fortes températures est alors appréhendée *via* le développement et l'utilisation de modèles de simulation de la transpiration, de l'état hydrique dans la plante et de l'activité photosynthétique de l'échelle de la feuille à celle de la canopée.

Les travaux sur les céréales menés dans l'équipe « Modélisation et analyse de l'interaction génotype-environnement » visent à identifier l'effet d'allèles de gènes sur des fonctions importantes de la plante (croissance foliaire, développement reproducteur, transpiration) en fonction des conditions environnementales. L'objectif est de fournir des outils (modèles) permettant de définir, à l'intérieur d'un scénario climatique donné, les combinaisons d'allèles favorables. Pour ce faire, les chercheurs modélisent les fonctions étudiées, analysent la variabilité génétique des paramètres des modèles et intègrent le tout dans des modèles de culture testés au champ.

Le LEPSE est pionnier dans le développement de plateformes de phénotypage, dispositifs permettant d'exposer, grâce à des automates, de grandes collections de génotypes (variétés, lignées, accessions) à des stress environnementaux maitrisés tout en mesurant, souvent par imagerie, leur croissance ou leur développement. Ces équipements permettent d'étudier l'expression des gènes et leurs fonctions à différents niveaux d'organisation — de la cellule jusqu'à la plante entière — dans des conditions environnementales contrôlées.

Adaptation des plantes aux contraintes de l'environnement : de la perception aux réponses moléculaires et physiologiques

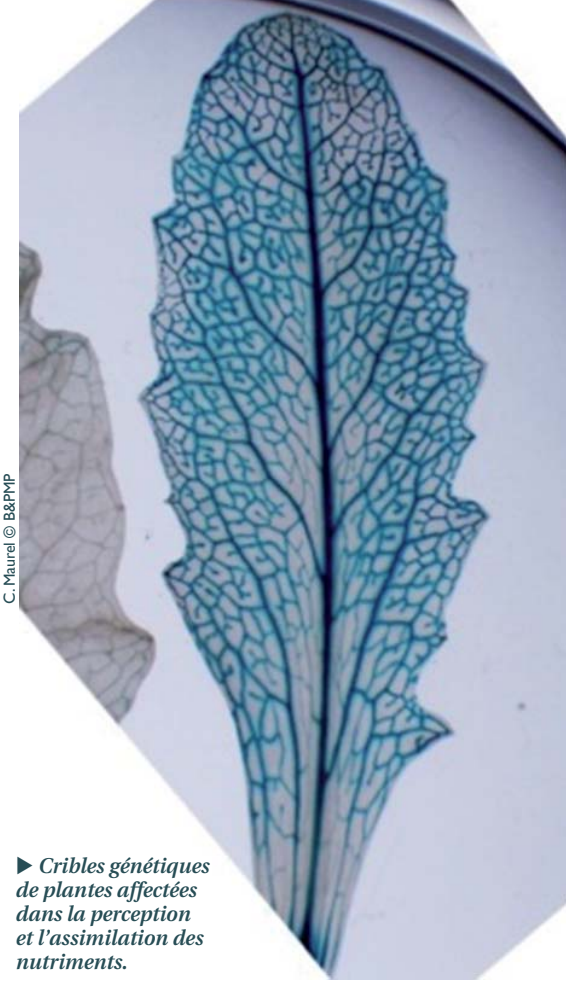
L'**UMR** ***« Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes »*** **(B&PMP – Inra, CNRS, Montpellier SupAgro, UM)** se consacre à l'exploration des mécanismes qui gouvernent le statut hydrominéral des plantes, dans des conditions abiotiques contrastées. Ces recherches intègrent des disciplines telles que la biochimie, la biologie moléculaire et cellulaire, la physiologie, la biophysique et la génétique, en s'appuyant principalement sur l'étude de la plante modèle *Arabidopsis*. Le laboratoire s'est récemment engagé dans des programmes de biologie des systèmes impliquant des approches de modélisation mathématique.

L'unité B&PMP est mondialement connue pour ses études sur les activités de transport des cellules végétales (canaux et transporteurs membranaires) mais aussi pour ses analyses physiologiques de la nutrition minérale. Toutefois, les programmes de recherche du laboratoire concernent également les mécanismes de perception et de signalisation permettant aux plantes de s'adapter aux contraintes de l'environnement (stress hydrique, stress salin, carences minérales, toxicité métallique). Les processus développementaux du système racinaire et de son adaptation morphologique en réponse aux contraintes abiotiques sont également étudiés, ainsi que les aspects métaboliques liés à l'utilisation des minéraux, à leur assimilation ou à leur toxicité.

Plusieurs des thématiques de recherche développées à B&PMP portent directement sur les effets des changements climatiques. Le déficit général en eau douce et les épisodes répétitifs de sécheresse comptent, par exemple, parmi les menaces liées aux changements climatiques les plus fortes, y compris dans les zones tempérées. Par ailleurs, les teneurs excessives en CO_2 — qui engendrent ces changements — diminuent la capacité des plantes à absorber le nitrate ou à fixer certains micronutriments comme le fer ou le zinc. Ces phénomènes peuvent réduire significativement le rendement des cultures et leurs qualités nutritives.

B&PMP possède toutes les capacités scientifiques et techniques pour analyser les mécanismes physiologiques et génétiques impliqués dans la réponse des plantes à ces nouvelles contraintes de l'environnement. Les travaux de l'unité permettront de développer des cribles phénotypiques originaux pour la sélection variétale ou pour de nouvelles pratiques culturales, contrecarrant ainsi les effets néfastes du changement climatique sur les cultures. •••

Voir un exemple de projet conduit par l'UMR B&PMP page 18.



C. Maurel © B&PMP

▶ ***Cribles génétiques de plantes affectées dans la perception et l'assimilation des nutriments.***

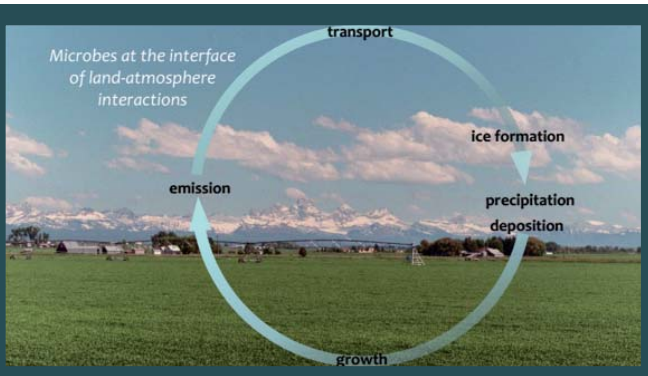
Influence des pratiques agronomiques sur le microclimat et sur les maladies des plantes

Mistral (« MIcrobiologie des agroéco-Systèmes : TRAnsfert de connaissances sur L'histoire de vie d'agents phypathogènes vers la protection des plantes et les processus climatiques ») est le nom à la fois d'un projet de recherche et de l'équipe qui le conduit au sein de l'UR « Pathologie Végétale » *(voir page 59)*.

L'équipe Mistral mène des études sur l'écologie de microorganismes phytopathogènes à dissémination aérienne et aquatique, tout en animant un réseau interdisciplinaire international sur le thème de l'adaptation au changement climatique.

Via le projet Mistral, elle a mis au jour la présence d'une grande diversité de lignées génétiques (pathogènes et non pathogènes) pour plusieurs agents phytopathogènes et en particulier pour la bactérie *Pseudomonas syringae*. Également reconnue pour son activité glaçogène et pour sa capacité de dissémination dans la troposphère jusqu'aux nuages, cette bactérie constitue un objet d'étude intéressant du fait de son lien avec le cycle hydrologique : elle est en effet impliquée dans les processus atmosphériques clés de la formation de la pluie.

Les travaux de l'équipe visent à contribuer à la compréhension du cycle de bioprécipitation, un cycle où les microorganismes glaçogènes tels que *P. syringae* sont à l'interface des échanges entre la végétation et l'atmosphère. L'enjeu de ce travail est d'évaluer à quel point les pratiques agronomiques — à travers les variétés de plantes cultivées, leurs organisations spatiales dans un paysage et les traitements phytosanitaires — sont des leviers d'une part pour moduler une sècheresse à l'échelle d'une région, d'autre part pour la protection de la santé des plantes.



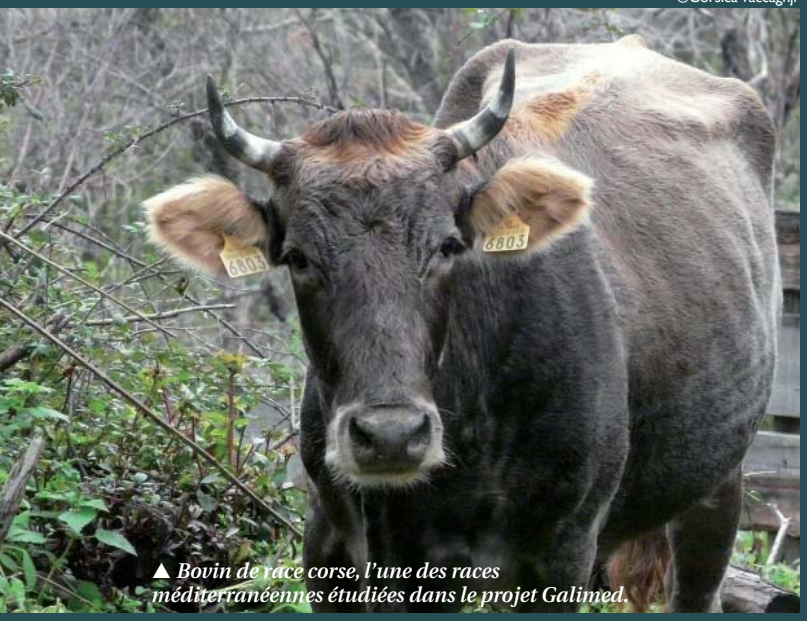
© C. Morris

▲ ***Le cycle de bioprécipitation : interactions entre la végétation et les processus atmosphériques*** **via** ***les microorganismes associés aux plantes.***
(Morris **et al.,** ***2014.*** **Global Change Biology** ***20: 341-351).***

Contact : Cindy Morris, cindy.morris@avignon.inra.fr
Pour plus d'informations : http://bioice.wordpress.com

Bases génétiques de l'adaptation des races bovines locales en région méditerranéenne

©Corsica Vaccaghji



▲ *Bovin de race corse, l'une des races méditerranéennes étudiées dans le projet Galimed.*

Via une approche multidisciplinaire combinant génétique des populations, études pédoclimatiques et étude des systèmes de production, le projet de recherche Galimed étudie les bases génétiques de l'adaptation des races bovines locales en région méditerranéenne. Plus précisément, Galimed a pour objectifs :

- de caractériser génétiquement 19 races bovines méditerranéennes ;
- d'étudier leur environnement et leurs différents systèmes d'élevage ;
- de décrire la covariation entre ces différents facteurs ;
- et d'identifier dans leur génome les signatures de sélection associées à l'adaptation à l'environnement.

Ce projet permettra d'améliorer la connaissance des races bovines locales en région méditerranéenne afin de proposer des solutions de conservation, et d'en tirer partie pour faire face aux conséquences du changement climatique global.

Ce projet est fondé sur l'obtention de données de trois ordres concernant des races locales méditerranéennes :

❶ des génotypes obtenus à l'aide d'une puce de génotypage bovine « 50 000 SNPs » *(Single Nucleotide Polymorphism)* ;
❷ des données pédoclimatiques ;
❸ des informations, obtenues grâce à plusieurs enquêtes et questionnaires, sur les systèmes d'élevage et sur la perception qu'ont les éleveurs de l'adaptation des animaux au climat.

Les 19 populations bovines à l'étude ont toutes été échantillonnées, génotypées et caractérisées génétiquement (par exemple grâce à une analyse en composante principale et à une classification hiérarchique non supervisée). On a pour cela utilisé les génotypes précédemment obtenus d'une vingtaine de races bovines représentatives des trois principaux grands groupes de bovins : taurins européens, taurins africains et zébus. Cette analyse exploratoire a ainsi pu préciser la proximité génétique entre les races du bassin méditerranéen.

Par ailleurs, des données climatiques dans les zones d'étude et des informations sur les différents systèmes d'élevage ont également été recueillies. Quatre enquêtes approfondies ciblant des races marocaines, corses, italiennes et égyptiennes sont quant à elles en cours de réalisation. L'analyse conjointe des données génétiques et environnementales constituera l'aboutissement de ce projet.

Le projet Galimed est porté par l'UMR « Génétique Animale et Biologie Intégrative » (Inra, AgroParisTech), en collaboration avec les UMR InterTryp *(voir page 65)* et Selmet et 12 autres partenaires en Méditerranée. Ce projet est financé par le méta-programme Inra « Adaptation au changement climatique de d'agriculture et de la forêt ».

Contact : Laurence Flori, laurence.flori@jouy.inra.fr

Pour plus d'informations : http://mediterranee.cirad.fr/recherche_en_partenariat/quelques_projets/systemes_d_elevage/galimed

Aider les agriculteurs des hautes terres de l'Afrique de l'Est à s'adapter au changement climatique

Le projet R&D quadriennal « Impacts des changements climatiques sur les services écosystémiques et la sécurité alimentaire en Afrique de l'Est » (CHIESA) s'intéresse à la fois à l'agriculture, à l'hydrologie, à l'écologie et à la géomatique. Ce projet vise à remédier au manque de connaissances des impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire, sur les moyens de subsistance et sur le développement économique des communautés vivant dans les *hot-spots* que sont les écosystèmes des hautes terres d'Afrique de l'Est.

Les activités de CHIESA se concentrent en particulier sur trois écosystèmes : le mont Kilimandjaro en Tanzanie, la chaîne montagneuse du Taita au Kenya et celle de Jimma en Éthiopie. Sur ces trois *hot-spots*, les équipes observent les conditions météorologiques et détectent les modifications du couvert végétal et celles liées à l'utilisation des terres. Elles étudient également la pression des bioagresseurs, les services écosystémiques, la notion de sécurité alimentaire, ou encore les facteurs biophysiques et socioéconomiques qui affectent les rendements des cultures.

Des actions de recherche et de formation permettent de renforcer les capacités des organismes de recherche, des agents de vulgarisation et des décideurs impliqués, en matière de recherche environnementale et de stratégies d'adaptation au changement climatique.

En associant les communautés locales à leur travail, les acteurs du projet vont ainsi développer, tester et diffuser des outils d'adaptation au changement climatique, et proposer des options et des stratégies de production appropriées au niveau des exploitations. Pour ce faire, le projet améliore les dispositifs de surveillance et de prévision existants en installant des stations météorologiques automatiques et il diffuse des résultats scientifiques à tous les acteurs, de l'agriculteur au décideur.

L'UR B-AMR *(voir page 58)* gère pour sa part la composante « café » du projet CHIESA, l'ensemble étant coordonné par le Centre international de physiologie et d'écologie des insectes basé à Nairobi (Kenya) et financé par le ministère finlandais des Affaires étrangères.

Contacts : Régis Babin, regis.babin@cirad.fr
Fabrice Pinard, fabrice.pinard@cirad.fr

Pour plus d'informations : http://chiesa.icipe.org

Un partenariat mondial de recherche en agriculture pour un avenir sans faim

Le **CGIAR, consortium des 15 centres internationaux de recherche agricole,** a pour objectifs fondamentaux de réduire la pauvreté rurale, d'améliorer la sécurité alimentaire, la santé et la nutrition des populations, ainsi que de promouvoir une gestion durable des ressources naturelles.

Les centres du CGIAR mènent des activités de recherche en collaboration étroite avec des centaines d'organisations privées ou publiques (instituts de recherche régionaux et nationaux, organisations issues de la société civile, institutions académiques…).

Partenaires internationaux implantés à Montpellier
Consortium du CGIAR
LABEX Embrapa **LABoratoire EXtérieur sans murs de l'*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* (Brésil)** (Embrapa)
LABINTEX **LABoratoire EXtérieur sans murs de l'*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* (Argentine)** (INTA)

Par le biais de programmes de recherche multipartites, ces centres produisent et partagent des connaissances et des approches relatives au développement agricole. Ayant son siège à Montpellier, le Consortium CGIAR entretient des relations étroites avec les membres de la communauté d'Agropolis et, au-delà, avec des partenaires français et européens. Les recherches menées par ces centres, dans ce contexte, sont soutenues par un fonds multi-donateurs, le Fonds CGIAR. Parmi les sujets de recherche abordés, l'adaptation au changement climatique est un thème essentiel et transversal à l'ensemble des travaux menés par le CGIAR.

C'est, en particulier, la vocation du programme de recherche du CGIAR (*CGIAR Research Programme* – CRP) sur le changement climatique, l'agriculture et la sécurité alimentaire (*Climate Change, Agriculture and Food Security* – CCAFS) que de coordonner les efforts de recherche sur cette thématique au sein des centres du CGIAR ainsi qu'avec leurs partenaires, le tout en collaboration avec les autres CRP thématiques. CCAFS s'efforce d'articuler quatre grands domaines scientifiques interdépendants, qui présentent tous une composante liée à l'adaptation au changement climatique :

- L'agriculture climato-intelligente *(climate smart agriculture)* : développer et tester les technologies et les pratiques à même d'assurer la sécurité alimentaire, de favoriser l'adaptation et d'atténuer les effets de l'agriculture sur le changement climatique.
- L'information sur le climat : développer des services dédiés aux agriculteurs, visant à leur offrir des conseils plus pertinents, à les aider à mieux gérer leurs systèmes de protection, en permettant notamment d'indexer les assurances agricoles sur les risques météorologiques.
- Les mécanismes incitatifs pour une agriculture à faible niveau d'émissions : développer et tester des mécanismes incitatifs, des politiques et des indicateurs en faveur de l'adaptation et de l'atténuation des effets du changement climatique.
- Les politiques et les institutions pour des systèmes alimentaires résilients : questionner, évaluer, simuler des politiques de sécurité alimentaire et des modes de gouvernance, aux niveaux national et global, en s'appuyant sur la modélisation et les scénarios, pour permettre une adaptation des systèmes alimentaires. •••

N. Palmer © CIAT

Des recherches coordonnées en faveur de l'adaptation des systèmes agricoles du monde au changement climatique

L'effort de coordination mené par le programme CCAFS a stimulé les coopérations et permis d'atteindre des résultats probants. À titre d'exemple, le programme a rassemblé des organisations scientifiques de plusieurs pays afin de produire des informations météorologiques pertinentes et de les transmettre aux communautés rurales. Ainsi, au Sénégal, les prévisions météorologiques saisonnières et à 10 jours sont diffusées en 14 langues tout au long de la saison des pluies par le biais d'une radio communautaire. Le bulletin météorologique, conçu au départ comme un petit projet pilote, atteint désormais plus de deux millions de personnes.

Sur un autre continent, le CIMMYT (Centre international pour l'amélioration du maïs et du blé) a récemment lancé, dans quatre villages du nord de l'Inde, un programme de conseils sur l'agriculture climato-intelligente. Les agriculteurs reçoivent ainsi sur leur téléphone portable des informations qui, notamment, promeuvent des technologies permettant de limiter les risques liés au changement climatique.

Dans un autre registre, l'IRRI (Institut International de Recherche sur le Riz), en collaboration avec d'autres partenaires, gère le projet CLUES sur l'adaptation des systèmes de cultures rizicoles au changement climatique dans le Delta du Mékong. L'objectif est de lever les contraintes à l'adaptation des agriculteurs face à la modification du régime hydrologique du Mékong résultant du changement climatique.

Des pratiques plus économes sont aussi encouragées, comme l'alternance inondation/assèchement qui permet, à rendement égal, de réduire de 15 à 30 % la consommation d'eau et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. D'autres travaux concernent la création et la diffusion de variétés adaptées aux conditions environnementales : des cultivars de riz plus tolérants à l'immersion et à la salinité sont par exemple développés à l'IRRI. À l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA), une banque de ressources génétiques du niébé est constituée afin de conserver la diversité génétique qui permettra de mettre au point des variétés plus résistantes à la sècheresse, aux maladies, etc.

Les résultats des centres de recherche du CGIAR témoignent aussi des progrès en matière d'adaptation des politiques publiques. Ainsi, le travail du CIAT (Centre International d'Agriculture Tropicale), analysant les impacts du changement climatique sur la production de café, a permis au gouvernement du Nicaragua de mettre en place un plan national d'adaptation pour l'agriculture. Ce plan, qui comprend notamment des mesures visant à adapter les moyens de subsistance des petits producteurs de café et à diversifier leurs revenus, a attiré d'importants investissements du Fonds International de Développement Agricole — 24 millions de dollars — destinés à soutenir les producteurs de café et de cacao dans leurs transitions liées aux changements climatiques.

Contact : Alain Vidal, A.Vidal@cgiar.org

◀ *Travail au champ dans le cadre du CRP* Roots, Tubers & Bananas *en Afrique de l'Est.*

▲ *Paysage cultivé au Brésil.*
© Katia Pichelli/Embrapa

Pour une agriculture à faible émission de carbone au Brésil

Le **LABEX de l'Embrapa (laboratoire extérieur sans murs du Centre brésilien de recherche agricole/ *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária***), installé à Montpellier sur le campus Agropolis depuis plus de 10 ans, constitue une porte d'entrée vers la recherche européenne pour les chercheurs brésiliens.

Une gestion des ressources naturelles basée sur la connaissance constitue le fondement d'une agriculture durable et efficace, afin de construire un développement en harmonie avec la protection de l'environnement.

L'agriculture peut ainsi constituer une solution — et non un problème — si la préservation de l'environnement et la conservation de la biodiversité sont bien prises en compte. Au cours des 40 dernières années, les rendements des cultures au Brésil ont augmenté de 4 % par an (soit un gain de 200 % !) et les surfaces agricoles de 30 %.

Le développement des technologies agricoles a permis une intensification de l'utilisation des terres, préservant ainsi les 60 % du territoire brésilien classés en réserves biologiques, parcs naturels et territoires autochtones. Depuis 4 ans, le « programme brésilien pour une agriculture à faible émission de carbone » apporte les financements et incitations nécessaires à l'adoption par les agriculteurs de pratiques et de technologies agricoles durables. Le système de recherche agricole brésilien, coordonné par l'Embrapa et incluant plus de 70 universités et instituts de recherche agronomique, développe des pratiques durables d'intensification, d'un point de vue technologique et politique, pour augmenter non seulement la productivité, mais aussi la fourniture de services environnementaux. La recherche a ainsi contribué à la conception de politiques alternatives de protection forestière et à de nouvelles pratiques permettant de diminuer la déforestation en Amazonie.

Des collaborations renforcées avec le Brésil grâce au LABEX Embrapa

Grâce au LABEX Embrapa, trois chercheurs brésiliens ont été accueillis au sein des unités de recherche d'Agropolis, contribuant à la thématique de la gestion durable des ressources naturelles :

- Dr. José Madeira a rejoint le Laboratoire d'étude des Interactions Sol, Agrosystème et Hydrosystème (UMR LISAH) afin d'étudier l'hydrologie des milieux cultivés. Son travail concernait la modélisation des interactions entre pratiques agricoles et indices environnementaux par le développement et la validation de modèles et par l'établissement d'indices de végétation pour des cultures ayant une canopée discontinue (vignobles, vergers…). Les données provenaient de l'analyse d'images, en collaboration avec l'UMR TETIS. Les modèles développés décrivent les écoulements d'eau et l'impact des pratiques de gestion dans des micro-bassins présentant une occupation agricole intensive.

- Dr. Geraldo Stachetti Rodrigues a été accueilli au sein de l'UR « Performance des systèmes de culture des plantes pérennes » pour réaliser une étude d'impact et développer des indicateurs de systèmes intégrés pour la gestion environnementale d'activités rurales. Son équipe a utilisé une approche intégrée pour évaluer l'huile de palme selon les normes internationales de certification environnementale et des critères de durabilité *sensu stricto*. Ce travail visait l'établissement d'indicateurs pour des systèmes de cultures pérennes : durabilité écologique, viabilité économique, équité sociale d'activités rurales de production axées sur le développement durable. Le travail a permis de consolider les avancées scientifiques des partenaires en matière de développement agricole durable.

- Les méthodes de télédétection et d'analyse d'images sont devenues des outils essentiels pour le suivi agronomique et du changement d'occupation des terres. Dr. Margareth Simões a intégré l'UMR « Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale » (TETIS) pour étudier la dynamique de zones rurales par l'interprétation des changements d'utilisation des terres. Les résultats fourniront des outils robustes appuyant les politiques publiques dans la transition nécessaire d'un modèle d'agriculture extensive vers un modèle écologiquement intensif.

Contact : Claudio Carvalho, claudio.carvalho@embrapa.br

Réduire les émissions des gaz à effet de serre par l'élevage en Argentine

Le LABINTEX élabore actuellement, avec l'UMR « Herbivores » de l'Inra de Clermont-Ferrand et le *Scotland's Rural College* (SRUC) d'Edimbourg (Écosse, Royaume-Uni), un projet de recherche conjoint (PRC) sur le thème : « Durabilité environnementale des systèmes d'élevage intensifiés de ruminants ». Ces équipes contribuent à former des techniciens de l'INTA aux méthodes de mesure des émissions de méthane entérique chez les ruminants. Les objectifs du PRC sont les suivants : évaluer ces émissions, mettre au point des techniques d'atténuation et étudier une approche systémique, à l'échelle de l'exploitation rurale, de technologies appliquées à ces atténuations.

Conformément aux préconisations de ce PRC, des évaluations d'émissions de méthane entérique prélevées dans différentes régions agro-écologiques d'Argentine sont effectuées. À cet effet, en 2014, le SRUC a fourni à l'Argentine des instruments et du matériel technique permettant de mesurer ces émissions, et il a conseillé l'INTA dans la mise en place de deux chambres d'échange gazeux installées dans des centrales expérimentales de régions tempérées et subtropicales du pays. En tant que membre de l'Alliance Mondiale de Recherche, l'Argentine participe d'ailleurs, *via* l'INTA et au sein du *Livestock Research Group*, au projet Fontagro qui vise à ajuster les évaluations des inventaires de GES concernant le bétail d'Amérique latine.

Contact : Daniel Rearte, drearte@agropolis.fr

© INTA

▼ *L'INTA développe des sacs à dos pour vache, qui capture le méthane afin de le transformer en énergie verte.*

Pour la durabilité environnementale des systèmes d'élevage en Argentine

Le **LABINTEX (LABoratoire Extérieur sans murs de l'INTA – *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*/Institut National Argentin de Technologies Agricoles),** installé à Montpellier sur le campus Agropolis depuis 3 ans, constitue une porte d'entrée vers la recherche européenne pour les chercheurs argentins. L'une de ses quatre thématiques de prédilection concerne les technologies pour la conservation et la gestion durable de l'environnement. D'une manière plus générale, l'INTA œuvre en priorité pour la conservation des ressources naturelles et la durabilité environnementale, économique et sociale de l'agriculture.

Le secteur agricole constitue la base de l'économie argentine : au plan national, l'agriculture représente 9,5 % du produit intérieur brut ; au plan mondial, l'Argentine est le 1er exportateur de farine de soja, le 2e exportateur de maïs, de sorgho, d'huile de tournesol et de miel, le 3e exportateur de soja, le 4e de citron et le 5e de viande de bœuf. Dans un contexte global d'accroissement de la demande en denrées alimentaires (notamment en produits animaux), du fait de la croissance démographique, de l'urbanisation et de l'augmentation globale des revenus, et en prenant en compte la nécessaire adaptation du secteur agricole aux changements climatiques, il est essentiel pour ce pays de renforcer ses capacités de production alimentaire de façon durable. Afin de saisir l'opportunité économique qu'offre ainsi le marché international, l'Argentine devrait notamment renforcer sa production de viande de bœuf et de veau.

Par ailleurs, sur les deux dernières décennies, l'accroissement de la demande en céréales et en graines oléagineuses a engendré en Argentine une expansion des surfaces agricoles dédiées à ces cultures. Ce phénomène, couplé aux contraintes imposées par les politiques nationales sur la déforestation, a provoqué au cours des 15 dernières années une réduction des zones d'élevage de 15 millions d'hectares. Pour maintenir une offre conséquente en bœuf, les modes de production se sont donc intensifiés, passant de systèmes 100 % pastoraux à des systèmes faisant appel aux céréales et au fourrage, ainsi que, dans certains cas, un passage des animaux en enclos d'engraissage dans la phase finale précédant l'abattage.

Conséquences de ces changements, les performances reproductrices des troupeaux de bovins se sont améliorées, le taux de sevrage a augmenté et la proportion d'animaux non performants a diminué. L'alimentation plus digeste pour le bétail a augmenté la productivité avec pour conséquence indirecte une réduction de l'intensité des émissions de méthane entérique.

En collaboration avec l'*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* (Embrapa, Brésil) et l'*Instituto Nacional de Investigación Agropecuária* (INIA, Uruguay), l'INTA travaille sur les questions de l'adaptation de l'élevage aux changements climatiques et de l'atténuation des émissions de GES dans les systèmes d'élevage pastoral. L'exportation de viande de bœuf est en effet une composante majeure de l'économie de ces trois pays mais aussi de celle du Paraguay : à eux quatre, ces pays produisent un cinquième du cheptel bovin international — un chiffre qui montre clairement l'intérêt majeur que représente, au plan mondial, l'atténuation des GES émis par le bétail. ■

Liste des acronymes *et abréviations*

ANR	Agence Nationale de la Recherche
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Ciheam-IAMM	Centre International de Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes – Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CSIRO	*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (Australie)
EQUIPEX	Équipement d'Excellence
EMA	École des Mines d'Alès
Embrapa	*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* (Brésil)
ENSCM	École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier
EPHE	École Pratique des Hautes Études
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur L'Évolution du Climat
Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
Inra	Institut National de la Recherche Agronomique
Inrap	Institut National de Recherches Archéologiques Préventives
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
INTA	*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* (Argentine)
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
L-R	Languedoc-Roussillon
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers
R&D	Recherche et Développement
UAG	Université des Antilles et de la Guyane
UAPV	Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
UE	Union européenne
UM	Université de Montpellier
UMR	Unité mixte de recherche
UMS	Unité mixte de service
UNîmes	Université de Nîmes
UPMC	Université Pierre et Marie Curie
UPVD	Université de Perpignan *Via Domitia*
UPVM	Université Paul-Valéry de Montpellier
UR	Université de la Réunion ou Unité de recherche
USDA/ ARS	*United States Department of Agriculture / Agriculture Research Service* (États-Unis)
USR	Unité de service et de recherche
UVSQ	Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

Cette publication a été réalisée avec le soutien de l'État et de la Région Languedoc-Roussillon.

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

AgroParisTech
Agropolis Fondation
BRGM
Consortium du CGIAR
Ciheam-IAMM
Cirad
CNRS
CSIRO
EMA
Embrapa
Ifremer
Inra
INTA
IRD
Irstea
Montpellier SupAgro
UAPV
UM
UNîmes
UPMC
UPVD
UPVM
USDA/ARS

Directeur de la publication : Bernard Hubert

Coordination scientifique : Sandra Ardoin-Bardin (IRD), Nicolas Arnaud (CNRS), Sophie Boutin (UM), Jean-Luc Chotte (IRD), Philippe Jarne (CNRS), Pascal Kosuth (Agropolis Fondation), Philippe Lebaron (UPMC), Éric Servat (IRD)

Coordination Agropolis International : Mélanie Broin

Édition scientifique : Édith Rolland, Isabelle Amsallem (Agropolis Productions)

Communication : Nathalie Villeméjeanne

Conception, mise en page et infographie : Olivier Piau (Agropolis Productions) *info@agropolis-productions.fr*

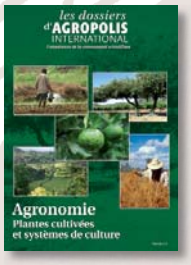
Ont participé à ce numéro : François Affholder, Véronique Alary, Nadine Andrieu, Sandra Ardoin-Bardoin, Nicolas Arnaud, Andrée Avogadri, Régis Babin, Christian Baron, Olivier Barrière, Éric Blanchart, Jean-Louis Bodinier, Jérôme Boissier, Aurélie Botta, François-Yves Bouget, Sophie Boutin, Yvan Caballero, Claudio Carvalho, Tiphaine Chevallier, Jean-Luc Chotte, Christian Cilas, Pascal Conan, Pierre Couteron, Laurent Dagorn, Gauthier Dobigny, David Dorchies, Robin Duponnois, Laurent Durieux, Katrin Erdlenbruch, Frédérique Espinasse, Bruno Fady, Jack Falcón, Denis Fargette, Laurence Flori, Richard Franck, Grégoire Freschet, Patrice Garin, Christian Gary, Denis Gautier, Alain Givaudan, Catherine Gonzales, Jean-François Guegan, Hélène Guis, Katell Guizien, Stephan Hättenschwiler, Serge Heussner, Nathalie Hodebert, Marie Hrabanski, Alexandre Ickowicz, Frédéric Jacob, Emmanuel Jacquot, Philippe Jarne, Richard Joffre, Anne Johannet, Mireille Jourdan, Fabien Joux, Carole Kerdelhue, Pascal Kosuth, Franck Lartaud, Pierre-Éric Lauri, Philippe Lebaron, Éric Lebon, Nadine Le Bris, Grégoire Leclerc, François Lefèvre, Thierry Lefrancois, Thérèse Libourel, Bruno Locatelli, Éric Malezieux, Jean-Christophe Maréchal, Sébastien Mas, Christophe Maurel, Philippe Méral, Aurélie Metay, Agnès Mignot, Guillaume Mitta, Jérôme Molénat, Hervé Moreau, Cindy Morris, Behzad Mostajir, David Mouillot, Krishna Naudin, Claire Neema, Didier Peuze, Daniel Rearte, Pierre Renault, Sandrine Renoir, Éric Rigolot, François Roger, Ophélie Ronce, Joëlle Ronfort, Jacques Roy, Denis Ruelland, Bertrand Schatz, Jose Serin, Georges Serpantié, Éric Servat, Andy Sheppard, Frédéric Simard, Lincoln Smith, Michelle Stuckey, Julie Subervie, Marcelino Suzuki, Olivier Thaler, Didier Tharreau, Patrice This, Thierry Thomann, Jean-Philippe Tonneau, Ève Toulza, Jean-Marc Touzard, Julie Trottier, Olivier Turc, Valérie Verdier, Anne-Aliénor Very, Alain Vidal, Yves Vigouroux, Nathalie Volkoff

Remerciements pour l'iconographie : tous les contributeurs au dossier, la photothèque Indigo de l'IRD.

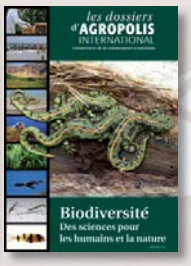
Impression : *Les Petites Affiches* (Montpellier)
ISSN : 1628-4240 • **Dépôt légal :** Février 2015

Également disponible en anglais

Vingt dossiers parus dans la même collection dont :

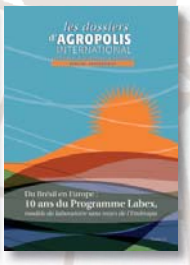


Juillet 2010
68 pages (2nde éd., 2012)
Français et anglais



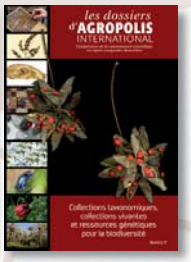
Octobre 2010
84 pages
Français et anglais

Février 2012
72 pages
Français, anglais, espagnol

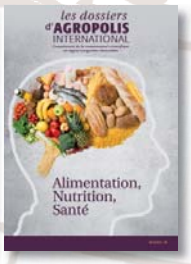


Octobre 2012
48 pages
Français et anglais

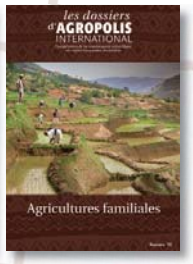
Février 2013
48 pages
Français, anglais, espagnol



Octobre 2013
76 pages
Français



Décembre 2013
72 pages
Français et anglais



Février 2014
64 pages
Français, anglais, espagnol

Les dossiers d'Agropolis International

La série des « *dossiers d'Agropolis International* » est une des productions d'Agropolis International dans le cadre de sa mission de promotion des compétences de la communauté scientifique. Chacun de ces dossiers est consacré à une grande thématique scientifique. On peut y trouver une présentation synthétique et facile à consulter de tous les laboratoires, équipes et unités de recherche présents dans l'ensemble des établissements d'Agropolis International et travaillant sur la thématique concernée.

L'objectif de cette série est de permettre à nos différents partenaires d'avoir une meilleure lecture et une meilleure connaissance des compétences et du potentiel présents dans notre communauté mais aussi de faciliter les contacts pour le développement d'échanges et de coopérations scientifiques et techniques.

En savoir plus : www.agropolis.fr/publications/dossiers-thematiques-agropolis.php

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