



les dossiers
d'**AGROPOLIS**
INTERNATIONAL

Compétences de la communauté scientifique

Le sol,
épiderme vivant
de la Terre

AGROPOLIS INTERNATIONAL

agriculture • alimentation • biodiversité • environnement

Agropolis International associe les institutions de recherche et d'enseignement supérieur de Montpellier et du Languedoc-Roussillon, en partenariat avec les collectivités territoriales, avec des sociétés et entreprises régionales, et 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 : plus de 2 200 cadres scientifiques dans plus de 110 unités de recherche à Montpellier et en Languedoc-Roussillon, dont 300 scientifiques à l'étranger répartis 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 et filières de productions agricoles méditerranéennes et tropicales
- Biotechnologie et technologie agroalimentaire
- Biodiversité, ressources naturelles et écosystèmes
- Eau, environnement et développement durable
- Sociétés et développement durable
- Génomique et biologie intégrative végétale et animale
- Alimentation et santé
- Qualité et sécurité alimentaire

Lieu de capitalisation et de valorisation des savoirs, espace de formation et de transfert technologique, plate-forme 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 permettant l'élaboration et la mise en place de politiques de développement.

Le sol, épiderme vivant de la Terre

Compétences en recherche de Montpellier et de la région Languedoc Roussillon dans le domaine du sol

Jusqu'à récemment, le sol était perçu comme le support des couverts végétaux. On sait aujourd'hui que les couverts végétaux ont construit les sols à la surface des continents, en y apportant des matières organiques à l'origine d'une activité biologique intense. La communauté scientifique considère désormais que les sols sont une construction de la biosphère, et qu'ils constituent le premier réservoir de biodiversité. Le sol est bien l'épiderme vivant de notre planète.

Cet « épiderme vivant » assure de nombreuses fonctions essentielles au développement des sociétés humaines. Ces fonctions vont de la production de biens indispensables aux hommes, de la régulation des grands cycles hydrologiques et biogéochimiques, jusqu'à l'enregistrement de notre histoire paléocologique et archéologique.

Les sols subissent toutefois une pression qui va toujours croissante du fait de l'augmentation des besoins et de l'intensification de leur usage.

Cette intensification se traduit souvent par leur dégradation lorsque cet usage devient excessif ou qu'il est mal maîtrisé. Il en résulte une perte des fonctions portées par les sols qui font peser de graves menaces sur la durabilité de nombreux écosystèmes. Les sols sont une ressource fragile qu'il est urgent de préserver.

Agropolis International rassemble plusieurs centaines de scientifiques impliqués dans la recherche et l'enseignement sur les sols, et constitue un pôle de premier plan au niveau européen. Ce dossier en atteste. Ce dossier a été labellisé par le comité français de l'**Année Internationale de la Planète Terre** qui a pour objectif de mieux faire connaître le rôle que jouent les Sciences de la Terre dans le développement des sociétés humaines.



Les sols produisent l'alimentation et l'habillement des hommes

Page 4

Les sols régulent l'écoulement des eaux continentales

Page 12

Les sols régulent les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs et des polluants

Page 20

Les sols sont des milieux vivants dont les organismes assurent de nombreuses fonctions

Page 30

Les sols enregistrent l'histoire des hommes et des écosystèmes

Page 38

Thématiques couvertes par les équipes de recherche

Page 44

Les formations à Agropolis International

Page 46

Liste des acronymes et des abréviations

Page 50



C.Dupraz © Inra

Paysage agroforestier de peupliers et colza

Les sols produisent *l'alimentation et l'habillement* des hommes

Les sols produisent la biomasse végétale - racines, bois, tiges, feuilles, fleurs, fruits, graines, écorce, sève, etc. - qui (i) sustente, soigne et habille les hommes, (ii) leur fournit l'énergie dont ils ont besoin pour cuire leurs aliments et se chauffer, et (iii) leur procure des matériaux pour leurs constructions, habitats et activités artisanales et industrielles. Cette fonction naturelle du sol a progressivement été domestiquée par l'homme au fil de son histoire. Sous la pression d'une demande en constante augmentation, les hommes ont dû simplifier et intensifier des systèmes de culture qui, à l'origine, s'appuyaient sur les rythmes naturels de renouvellement de la fertilité des sols. L'introduction récente des intrants chimiques et la mécanisation y ont beaucoup contribué. Ces pratiques ont eu pour conséquence de modifier les propriétés des sols et d'altérer leur capacité à assurer durablement l'ensemble de leurs fonctions. Des problèmes environnementaux sont alors venus s'ajouter à la question alimentaire. Ainsi, aux espoirs suscités par la révolution verte il y a une trentaine d'années ont succédé :

- (i) la crainte de voir la faim et la malnutrition se maintenir durablement dans certaines régions du globe et avec elles un cortège de conséquences allant jusqu'à des migrations et des conflits sociaux ;
- (ii) une remise en cause des systèmes d'intensification des productions et avec eux, des certitudes bâties sur un corpus de connaissances chèrement acquises ;
- (iii) des questionnements sur la capacité des sols de la planète à nourrir tous les hommes et sur la capacité des sociétés humaines à mettre en place des systèmes de production adaptés aux nouveaux enjeux.

À la fin du 20^e siècle, dans un grand élan de solidarité humaine, la communauté internationale s'est fixée des objectifs chiffrés de réduction de la faim dans le monde. Nous sommes à l'aurore du troisième millénaire et le spectre de la faim est toujours là. Des émeutes de la faim font leur apparition dans des pays où l'on croyait la sécurité alimentaire définitivement acquise.

Les ressources en sols de notre planète sont limitées. Tous les sols du globe ne sont pas cultivables et ceux qui sont cultivés n'ont pas tous le même potentiel de production. Les principales contraintes qui limitent leur potentiel sont l'acidité en zone tropicale et la salinité en zone méditerranéenne, une faible capacité d'échange et une forte sensibilité au compactage. Ceci dit, tous les sols de la planète sont affectés par des dégradations plus ou moins sévères induites par leur utilisation, agricole ou non. Ces dégradations, longtemps ignorées ou minorées, pèsent lourdement sur la sécurité alimentaire et la sûreté environnementale. Beaucoup de spécialistes s'accordent sur le fait que l'augmentation nécessaire de la production agricole devra venir prioritairement des sols déjà cultivés.

Nous avons donc plus que jamais besoin de revoir notre approche de l'utilisation des sols. Nous devons désormais changer de paradigme et considérer les systèmes de culture comme outils privilégiés pour gérer durablement les sols afin de produire la biomasse nécessaire aux hommes, tout en protégeant, voire en améliorant, nos ressources en sols. Ce faisant, les ressources hydriques et biologiques seront également améliorées. Le virage est déjà pris et une nouvelle agronomie est en voie de construction. Elle est plus « systémique » et puise dans les principes de l'écologie et les processus intrinsèques au sol pour intensifier les cultures tout en limitant les intrants chimiques. Cette agronomie est également plus sensible aux aspects économiques, sociaux, environnementaux, politiques et institutionnels, qui, à la fois, déterminent et sont déterminés par le processus de production. Des équipes de recherche françaises participent à cette dynamique ; les éléments de ce dossier l'attestent.

Rabah Lahmar (UMR SYSTEM)

Les sols produisent l'alimentation et l'habillement des hommes

Conception de systèmes de culture alliant performance économique et respect des ressources naturelles et environnementales

L'unité est structurée autour de deux axes scientifiques :

1. Méthodologies pour la conception ou l'évaluation des systèmes de culture ;
2. Rôle de la diversité biologique cultivée dans la productivité et la durabilité des systèmes de culture.

Ces axes interagissent au sein des programmes de recherche « Agroforesterie » (méditerranéenne et tropicale), « Monocultures pérennes » (bananier et viticulture), « Samba » (systèmes agro écologiques multi-espèces à base de cultures annuelles) et « Enherbement ».

Concernant le pilotage des systèmes (axe 1), des outils d'aide à la gestion de l'azote sont élaborés à partir de la combinaison de modèles de culture et d'indicateurs d'état du sol ou de la plante. En matière d'évaluation, les recherches concernent la conception et la validation d'indicateurs qui permettent de caractériser l'état des cultures dans les conditions du champ et l'intégration de ces indicateurs dans des outils d'analyse multicritères.

La priorité est donnée aux outils de conception de systèmes de culture multi-espèces en jouant sur leur association et sur les itinéraires techniques. Les systèmes candidats sont conçus en combinant la simulation numérique, des savoirs experts, des indicateurs d'évaluation agro-environnementale et des méthodes d'analyse multicritères. Ils sont ensuite expérimentés en station ou dans le cadre d'une démarche de prototypage en interaction avec des groupes d'acteurs. ●●●

Implantée en France et dans différents pays du Sud (Amérique latine, Afrique, Océanie), l'**unité mixte de recherche Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens** (UMR SYSTEM, Cirad, Inra, Montpellier SupAgro) produit des connaissances et des outils qui permettent d'évaluer, piloter ou concevoir des systèmes de culture alliant performance économique et respect de l'environnement. L'accent est mis sur l'utilisation de la diversité biologique des espèces cultivées pour assurer des performances agronomiques régulières (rendement, qualité) tout en limitant les impacts environnementaux défavorables.

L'hypothèse centrale est que la combinaison de plusieurs espèces est déterminante pour atteindre ces objectifs. Les études portent sur :

- la conduite simultanée de plusieurs espèces dans la même parcelle (cultures intercalaires en plantes pérennes) ;
- la rotation des cultures (bananier, cotonnier, céréales) ;
- des combinaisons spatio-temporelles plus complexes dans des systèmes à base d'annuelles (cultures sous couverture végétale vivante ou morte et sans travail du sol) ou de pérennes (parcelles multi-espèces et agroforesterie en zone tropicale humide).

Les principales équipes

UMR SYSTEM

Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens

(Cirad, Inra, Montpellier SupAgro)
22 scientifiques
Directeur : Jacques Wery,
wery@supagro.inra.fr
<http://umr-system.cirad.fr/>

UPR

Systèmes de semis direct sous couverture végétale (SCV)
(Cirad)

15 scientifiques
Directeur : Francis Forest,
francis.forest@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/couverts_permanents

UPR

Dynamique des forêts naturelles
(Cirad)

10 scientifiques
Directrice : Sylvie Gourlet-Fleury,
sylvie.gourlet-fleury@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/dynamique_forestiere

UPR

Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantation
(Cirad)

15 scientifiques
Directeur : Jean-Pierre Bouillet,
jean-pierre.bouillet@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/ecosystemes_plantations

UR

Plantes et Systèmes de culture Horticoles (PSH)
(Inra Avignon)

25 scientifiques
Directeur : Michel Génard,
michel.genard@avignon.inra.fr
www.avignon.inra.fr/les_recherches_/liste_des_unites/plantes_et_systemes_de_culture_horticoles_psh_1

... suite page 8



C. Dupraz © Inra

Association de blé et de jeunes noyers

L'agroforesterie : imiter la nature pour produire plus et mieux

La plupart des écosystèmes naturels sont des mélanges d'arbres et de plantes herbacées. En agroforesterie, arbres et cultures sont volontairement mélangés dans les parcelles agricoles. Les arbres produisent du bois et des fruits, fixent du carbone, enrichissent les sols, protègent les cultures contre le vent ou les excès climatiques, limitent la pollution des eaux souterraines en récupérant les engrais qui échappent aux cultures. Les cultures produisent des aliments, couvrent le sol, protègent les arbres contre la compétition de plantes agressives, forcent les arbres à avoir un enracinement profond qui leur permet de résister à la sécheresse. Le mélange d'arbres et de cultures induit une biodiversité plus importante dans la parcelle, qui pourrait permettre de réguler naturellement les attaques de parasites ou de prédateurs.

Les travaux en cours (UMR SYSTEM) ont mis en évidence la productivité remarquable de ces parcelles, supérieure de 30 à 60% à la production d'un assolement séparant arbres et cultures. Des modèles numériques permettent de simuler le

fonctionnement de ces systèmes complexes et de faire des expériences virtuelles pour identifier les modes de gestion les plus performants. Les travaux s'orientent maintenant vers la description de la biodiversité des parcelles agroforestières. L'objectif est d'obtenir des systèmes cultivés stables, moins sensibles aux aléas climatiques, aux attaques de maladies ou de prédateurs. Plusieurs millions d'hectares agroforestiers pourraient voir le jour en Europe au cours des 20 prochaines années. Cela permettrait une diversification progressive des exploitations agricoles, sans perte de revenu à court terme, car les cultures intercalaires conservent longtemps une production quasi normale avec les densités d'arbres aujourd'hui préconisées en agroforesterie (50 à 100 arbres par hectare). La production en Europe d'une ressource en bois de qualité à croissance rapide permettrait également de réduire notre dépendance vis-à-vis des bois tropicaux et donc de diminuer la pression sur les forêts tropicales menacées.

Contact : Christian Dupraz, dupraz@supagro.inra.fr

La culture associée : une agriculture de conservation des sols

Le terme de « culture associée » (*intercropping*) désigne la culture de deux ou plusieurs génotypes, espèces ou variétés, en même temps et dans un même champ. Ce type de culture associe généralement des fabacées (pois, lupin, fève, haricot, niébé...) avec des céréales (blé, maïs...) ou des plantes pérennes comme des arbres à fruit, à bois ou à gomme. Elle permet des interactions positives entre plantes, en particulier pour l'accès à la lumière, à l'eau, aux éléments nutritifs, l'un au moins des deux génotypes bénéficiant de la présence de l'autre sans le pénaliser.

Ainsi une complémentarité de niche s'opère avec le prélèvement plus compétitif de l'azote du sol par la céréale qui stimule la fixation d'azote de l'air par la symbiose rhizobienne de la fabacée. L'exsudation d'acides organiques ou la stimulation de l'activité phosphatase par la fabacée augmentent la disponibilité du phosphore du sol et en facilitent l'acquisition par la céréale. L'utilisation des ressources est donc plus efficace en culture associée qu'en culture monospécifique.

Il en résulte une meilleure conservation de la fertilité des sols. Les risques d'érosion des sols sont diminués par une couverture accrue dans le temps et l'espace et les risques d'invasion par les adventices ou divers pathogènes sont diminués. Son intérêt pour la production réside dans l'augmentation du rendement des espèces en association par rapport à la culture monospécifique.

Ce bénéfice peut atteindre 35%. Il est d'autant plus important que les traitements fertilisants ou phytosanitaires sont faibles, comme dans les agricultures familiales du Sud. La culture associée constitue donc une perspective de sécurité alimentaire mondiale fondée sur une intensification écologique plutôt que sur une utilisation accrue d'intrants chimiques.

Contacts :

Cathy Clermont-Dauphin, cathy.clermont@ird.fr
Jean-Jacques Drevon, drevon@supagro.inra.fr

L'analyse et la modélisation des liens entre la diversité biologique des espèces cultivées en mélange et les performances agronomiques ou les impacts environnementaux de ces systèmes constituent le cadre général des travaux conduits dans l'axe 2. À partir de l'hypothèse selon laquelle cette diversité biologique favorise la productivité et la résilience du système, le rôle d'une diversité fonctionnelle dans les systèmes de culture est analysé pour :

- optimiser l'utilisation des ressources ;
- diminuer les risques face à la variabilité pédoclimatique et aux ravageurs ;
- améliorer la stabilité pluriannuelle du fonctionnement, via l'analyse des capacités de résilience et de facilitation au sein de ces systèmes.

Les études concernent :

- le partage des ressources (eau, azote, lumière), dans l'espace et dans le temps, entre des cultures associées et ses conséquences sur leurs performances agronomiques ;
- les interactions entre la dynamique de la biocénose* et la stabilité des systèmes. Une attention particulière est portée à la dynamique de la matière organique du sol, à celle de la structure de la végétation et à celle des bioagresseurs dans les systèmes plurispécifiques.

* Ensemble des espèces présentes dans le système cultivé.

Étude de l'écophysiologie et de la conduite des plantes horticoles

L'unité de recherche **Plantes et Systèmes de culture Horticoles (UR PSH, Inra Avignon)** travaille sur l'écophysiologie et la conduite des plantes horticoles. Dans ce contexte, le sol est une composante essentielle de l'environnement de la plante pour comprendre les fonctions de nutrition hydrique et minérale ainsi que d'ancrage (pour les arbres en particulier). Plus spécifiquement, l'unité aborde le développement et l'architecture des systèmes racinaires ainsi que l'absorption d'eau et d'azote. Elle développe des modèles de simulation dynamique et tridimensionnelle qui permettent de prévoir l'évolution au cours du temps de la localisation et de la structure des systèmes racinaires dans le sol.

Pour ce faire, des modèles simulent les interactions dynamiques entre les processus de développement racinaire à l'échelle de chacune des racines (élongation, ramification, croissance radiale, mortalité) et le sol. Suivant les approches développées par l'unité, le sol est vu soit comme un milieu continu décrit par des propriétés qui varient dans l'espace (température, humidité, densité apparente, concentration de la solution du sol en nitrate),

Autres équipes concernées par ce thème

UMR Eco&Sols
Écologie fonctionnelle
et biogéochimie des sols
(IRD, Inra, Montpellier SupAgro)
45 scientifiques
Directeur : Jean-Luc Chotte,
jean-luc.chotte@ird.fr

UMR CEFÉ
Centre d'Écologie Fonctionnelle
et Évolutive
(CNRS, UMI, UM2, UM3, Montpellier SupAgro,
Cirad, EPHE)
72 scientifiques
Directeur : Jean-Dominique Lebreton,
direction@cefe.cnrs.fr
www.cefe.cnrs.fr

US
Analyse des eaux, sols et végétaux
(Cirad)
17 scientifiques
Directeur : Alain Aventurier,
alain.aventurier@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/analyses

UMR EMMAH
Environnement Méditerranéen et
Modélisation des Agro-Hydrosystèmes
(Inra, UAPV)
37 scientifiques
Directrice : Liliana Di Pietro,
dipietro@avignon.inra.fr
www.avignon.inra.fr/les_recherches_1/liste_des_unites/emmah_environnement_mediterraneen_et_modelisation_des_agro_hydrosystemes

soit comme un milieu structuré avec des fissures et des pores de géométries et dimensions variées. Des approches déterministes et stochastiques** sont alors combinées dans cette modélisation.

Concernant l'absorption, l'unité travaille en collaboration avec des physiciens du sol (UMR EMMAH, Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes, Inra Avignon) pour modéliser les transferts d'eau et d'éléments minéraux entre le sol et les racines. Par ailleurs, au sein de l'architecture racinaire, les sites privilégiés de l'absorption sont caractérisés en fonction de leur perméabilité et de leur conductivité (pour l'eau notamment) ou en fonction des besoins et des capacités de transport et d'assimilation de la plante (nitrate). D'autres collaborations sont développées avec des physiologistes de l'absorption

qui étudient les transporteurs (p. ex. UMR BPMP, Biochimie et physiologie moléculaire des plantes, CNRS, Inra, Montpellier SupAgro, UM2).

L'unité participe également à des travaux de recherche sur la « rhizodéposition », c'est-à-dire l'apport au sol de composés organiques des racines (racines mortes, exsudats). Ces travaux se font en collaboration avec l'Inra de Bordeaux (UMR TCEM, Transfert sol-plante et Cycle des Éléments Minéraux dans les écosystèmes cultivés).

De nouveaux systèmes de culture : le semis direct sous couverture végétale permanente

Face à la croissance démographique mondiale, les pays du Sud doivent

augmenter leur production agricole et en assurer la pérennité dans le temps et dans l'espace.

L'unité propre de recherche (UPR) Systèmes de semis direct sous couverture végétale (Cirad) conçoit de nouveaux systèmes de culture inspirés du fonctionnement des écosystèmes forestiers qui permet la production et la gestion *in situ* de la matière organique.

L'introduction de communautés de plantes multifonctionnelles dans des systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale (SCV) substitue des outils biologiques aux outils mécaniques. Cette couverture permanente protège le sol contre l'érosion et y restaure une activité biologique favorable à une nutrition minérale équilibrée et stabilisée des cultures. ●●●

** Méthode mathématique qui utilise le calcul des probabilités pour l'exploitation des données statistiques

Potentiel des pratiques de semis direct sous couverture végétale permanente pour une intensification écologique des systèmes de culture dans le contexte de l'agriculture familiale brésilienne

Les pays du Sud ont des conditions physiques et socio-économiques contraignantes : sol fragile et climat agressif, accès limité au marché des intrants et au crédit. Ces contraintes orientent la recherche agronomique internationale vers des systèmes innovants qui protègent et valorisent à l'optimum les ressources naturelles disponibles sur le court et le long terme. Ces systèmes reposent sur le concept d'intensification écologique. Parmi eux, les pratiques de semis direct sous couverture végétale permanente (SCV) présentent une grande diversité d'options techniques, en particulier dans le mode de gestion des matières organiques (résidus de récolte laissés sur le sol sous forme de mulch ou plante de couverture vive).

Pour évaluer ces systèmes de culture, l'UMR SYSTEM a installé chez des petits producteurs de la région d'Unai (Cerrados brésiliens), des dispositifs expérimentaux en milieu contrôlé et réel. En introduisant des fabacées et des graminées en relais dans la culture du maïs, les SCV permettent d'économiser l'eau. Ils réduisent de 50% les pertes d'eau par ruissellement, de 10 à 20% les pertes d'eau par évaporation du sol, et de 30% les pertes d'eau par drainage du fait du paillis de surface et de la consommation d'eau par la plante de couverture. De même, les SCV améliorent la nutrition azotée de la plante commerciale. Enfin, les importantes restitutions de phytomasse que permettent ces systèmes ont pour effet d'accroître la teneur en carbone du sol (de 0,3 à 1 t ha⁻¹ an⁻¹). Des modèles de simulation ont été également développés pour caractériser le fonctionnement complexe de ces SCV et pour évaluer leur impact réel sur la production et les ressources naturelles.

É. Scopel © Cirad



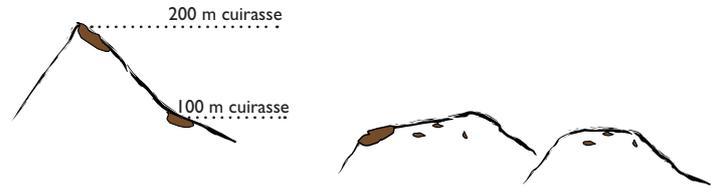
Association de maïs semé en direct et de pois d'Angole (Cajanus cajan) semé en relais (Brésil)

Ces modèles permettent d'assister la conception de nouveaux systèmes de culture qui i) répondent aux besoins des petits producteurs en termes de rendement et qui ii) sont compatibles avec les conditions socio-économiques locales.

**Contacts : Aurélie Metay, metay@supagro.inra.fr
Éric Scopel, eric.scopel@cirad.fr**

Étude des relations entre sols, diversité et production des forêts tropicales

Avec le climat, les sols déterminent la composition spécifique et la production des forêts tropicales, qu'elles soient naturelles ou d'origine anthropique. Par exemple, le diamètre et la hauteur des arbres sont d'autant plus petits que la profondeur du sol est faible et que le peuplement de la forêt tropicale humide est dense. De la même manière, la viabilité des plantations d'essences à croissance rapide (p. ex. eucalyptus et acacias) et/ou à forte valeur ajoutée (teck) est largement déterminée par les propriétés du sol. En s'appuyant sur des exemples issus de la forêt naturelle (Guyane française) et de plantations tropicales (bassin du Congo, Afrique de l'Ouest), des études menées par le Cirad (UPR *Dynamique des forêts naturelles* et UPR *Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantation*) veulent définir le rôle joué par le sol sur la structure de la forêt tropicale humide et la durabilité des plantations forestières. Pour la forêt tropicale humide, des dispositifs permanents d'étude de la végétation arborée ont été mis en place (nord de la Guyane) sur différents substrats géologiques, types de sols et une gamme de précipitations annuelles comprise entre 2 000 et 4 000 mm. Les travaux montrent que la composition floristique est influencée, à différentes échelles (locale ou régionale), par le type de sol en interaction avec le climat (gradient d'hydromorphie) ainsi que par l'histoire de la forêt durant l'Holocène (variations climatiques et activités humaines).



Répartition des cuirasses en fonction du modelé et de l'altitude en Guyane

Pour les plantations, les recherches s'appuient sur des sites instrumentés d'étude des cycles biogéochimiques, comme au Congo, et/ou sur des études des caractéristiques du sol à des échelles régionales. Les travaux montrent que les caractéristiques physiques et chimiques du sol, le cycle biologique (recyclage par les litières), le mode de gestion des peuplements visant à préserver les stocks de carbone et d'azote du sol et à limiter les exportations minérales sont des déterminants majeurs de la production et de la durabilité de ces plantations tropicales.

Contacts :

Vincent Freycon, freycon@cirad.fr

Laurent Saint-André, laurent.saint_andre@cirad.fr

Jean-Michel Harmand, harmand@cirad.fr

Le processus conduit, via une efficacité élevée des apports de fertilisants, à une production accrue de biomasse tant aérienne que souterraine qui, après quelques années, a pour résultat une séquestration de carbone atmosphérique. *In fine*, cette reconquête de la biodiversité végétale et animale au sein de l'écosystème cultivé, effet de l'intensification écologique, permet de tirer bénéfice des fonctions du sol ainsi restituées. Déjà, les recherches ont conduit à des associations performantes de cultures où le recours aux intrants chimiques est réduit de moitié.

De même, cette intensification de l'usage des processus écologiques limite dans certains cas les agressions parasitaires. Dès lors, la sélection variétale peut être avantageusement orientée vers l'amélioration de la qualité nutritionnelle des produits. Par exemple, la culture pluviale en SCV de nouvelles variétés de riz a permis le contrôle « naturel » de la pyriculariose ainsi qu'un potentiel

productif de l'ordre de 10 tonnes de grains par hectare, faisant ainsi du riz le « blé des tropiques ».

Aujourd'hui, la recherche s'oriente vers la résolution de deux problèmes majeurs :

- la lutte contre les adventices et les pestes végétales pour laquelle le recours au glyphosate et autres molécules herbicides dangereuses pour l'environnement est une solution non acceptable ;
- la maîtrise des ennemis des cultures - nématodes phytophages, champignons pathogènes, bactéries et insectes ravageurs - par des moyens de lutte qui restent à inventer. Des travaux fondamentaux doivent être entrepris pour tirer partie des propriétés allélopathiques des plantes et pour aboutir à la production industrielle d'éliciteurs et autres molécules organiques naturelles susceptibles de stimuler les fonctions immunitaires des plantes.

Une véritable synergie entre la recherche et l'industrie (productrice

des intrants organiques de demain), associée à une politique vigoureuse de formation des chercheurs et des producteurs, est nécessaire pour que soient adoptées ces innovations par les agriculteurs, en particulier dans les pays du Sud. La reconquête de millions d'hectares de terres aujourd'hui abandonnées faute d'un traitement agronomique approprié devrait devenir possible.

Les chercheurs travaillent sur trois continents. Depuis 30 ans, l'unité collabore avec l'Université d'État de Ponta Grossa au Brésil (plus de 20 millions d'hectares cultivés en SCV). Plusieurs chercheurs travaillent au Laos en partenariat avec l'Institut National de Recherche Agronomique et Forestière, au Cambodge avec l'Institut Cambodgien de Recherche sur le Caoutchouc et en Thaïlande avec l'Université de Kasetsart. Un dispositif important a été créé à Madagascar en collaboration avec le Centre de recherche agronomique pour le développement.

Fonctionnement des écosystèmes tropicaux de plantation

L'UPR *Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantations* (Cirad) a pour thématique centrale de recherche la mesure, la compréhension et la modélisation des processus de fonctionnement des écosystèmes tropicaux de plantations. Ceux étudiés par l'unité sont des plantations d'eucalyptus —pures ou en mélange avec des acacias (Congo, Brésil)—, des plantations de palmiers à huile (Indonésie) et d'hévéas (Thaïlande), des systèmes agroforestiers à base de caféiers (Costa Rica, Inde, Kenya) et des systèmes forestiers et agroforestiers des zones sèches à base d'*Acacia sp.*

Ses objectifs spécifiques sont :

- le développement des connaissances sur les principaux processus du fonctionnement hydrique (prélèvements au sol, évapotranspiration, transferts hydriques dans les sols, etc.), carboné (photosynthèse, allocation des assimilés dans la plante, respiration autotrophe et hétérotrophe) et minéral (minéralisation de la matière organique, prélèvements au sol, altération des minéraux du sol, fixation symbiotique de N₂) des écosystèmes tropicaux de plantations ;
- la quantification des principaux flux d'énergie, de carbone, d'eau et d'éléments minéraux au sein des écosystèmes tropicaux de plantations ainsi que les services qu'ils génèrent (production, séquestration du carbone, bilan hydrique, bilan minéral) ;
- le développement de modèles de fonctionnement basés sur les processus permettant de comprendre et de quantifier les effets respectifs de l'environnement (y compris le changement climatique), de l'usage antérieur des sols et des pratiques culturales sur la production et les impacts environnementaux

des écosystèmes tropicaux de plantations ;

- la définition de nouveaux modes de gestion durable des écosystèmes de plantation.

La démarche scientifique de l'unité repose sur une approche écosystémique, impliquant des recherches conjointes en écophysiologie, en biogéochimie et science du sol, en microbiologie, en agronomie et en biométrie, sur des expérimentations de terrain (essais agronomiques, sites ateliers instrumentés) et sur des approches de modélisation permettant de représenter les hétérogénéités spécifiques des écosystèmes (variabilité intra et inter rotations, variabilité inter parcelles). Les écosystèmes étudiés couvrent une large gamme de systèmes de gestion —de la petite propriété individuelle à la plantation industrielle—, de conditions environnementales, d'hétérogénéité du matériel végétal et de risques de déséquilibre nutritionnel. Les recherches conduisent à des recommandations agronomiques, à des modèles de production et de fonctionnement, des bilans entrées-sorties d'éléments minéraux, des bilans d'émission/séquestration de gaz à effet de serre et des indicateurs de fonctionnement agri-environnementaux. L'unité est implantée, d'une part, en France à Montpellier et à Nancy (Inra, UR Biogéochimie des écosystèmes forestiers) et, d'autre part, dans les pays du Sud dans le cadre de collaborations avec des institutions de recherche et d'enseignement supérieur de ces pays. Elle collabore aussi avec différentes UMR au niveau français.

Pour une gestion durable des forêts tropicales humides

Les forêts tropicales humides sont en train de disparaître à un taux annuel moyen d'environ 0,4 %. Les conséquences de cette disparition

sont multiples, notamment au niveau environnemental : dégagement de carbone dans l'atmosphère, dégradation et érosion des sols, perte de la diversité génétique, etc. Le protocole de Rio de 1992 a reconnu le besoin de gérer durablement ces forêts tropicales humides, c'est-à-dire d'exploiter leurs ressources en préservant à long terme leurs différentes fonctions écologiques, économiques et sociales.

Dans ce contexte, les objectifs de l'UPR *Dynamique des forêts naturelles* (Cirad) sont (i) de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers en fonction des facteurs abiotiques (sol, pluie, lumière...) et biotiques, et (ii) de quantifier l'impact de l'exploitation forestière sur les différents processus de la dynamique forestière.

L'essentiel des travaux de l'unité porte sur les forêts denses tropicales humides d'Amazonie, de la Guyane française et du Bassin du Congo. Ses objets d'étude sont les peuplements forestiers et les principales populations d'espèces ligneuses qui les composent sur des superficies d'environ une centaine d'hectares.

L'unité s'appuie sur des dispositifs expérimentaux suivis sur le long terme, développe des modèles de prédiction de l'évolution des peuplements et des populations et met au point des outils d'aide à la décision à l'intention des gestionnaires forestiers. Les connaissances acquises et les outils développés permettent d'identifier les scénarios d'exploitation compatibles avec les conditions du renouvellement des effectifs d'arbres et le maintien de leur diversité floristique et génétique. ■



P. Podwojewski © IRD

*Usage des terres au KwaZulu-Natal (Afrique du Sud).
La partie de droite est intensément cultivée en saison des pluies et
est parcourue par les animaux en saison sèche.
La partie de gauche, une ancienne ferme commerciale, est réservée au pâturage.*

Les sols régulent *l'écoulement des eaux* continentales

Les sols occupent une position clé au sein des hydrosystèmes terrestres du fait de leur position d'interface entre l'atmosphère et les réserves en eau souterraine. Les écoulements dont ils sont le siège déterminent aussi bien la distribution spatiale des contraintes hydriques subies par le milieu biologique que les transports de masse dont les conséquences sont marquées sur les plans environnementaux et agronomiques. La mesure, la compréhension et la modélisation des processus d'écoulement restent encore insuffisantes pour répondre efficacement à de nombreux enjeux environnementaux et agronomiques dans les milieux cultivés.

L'influence des sols est considérable sur les ressources et les transferts d'eau, en particulier dans les milieux cultivés, car ces milieux sont à la fois producteurs et utilisateurs des ressources hydriques (l'agriculture utilise près de 70% de l'eau douce consommée). L'impact des changements climatiques, l'augmentation des conflits d'usage des sols et de l'eau, la dégradation des sols et de la qualité des eaux sont des enjeux présents dans presque toutes les régions de la planète. La compréhension et la modélisation de l'influence de l'occupation et de la gestion des sols sur la production quantitative et qualitative des ressources en eau constituent une étape essentielle dans la recherche de stratégies durables de gestion des milieux. À cet égard, les équipes de recherche qui travaillent sur ce thème s'intéressent spécifiquement aux questions relatives à la formation de la ressource en eau superficielle et à son usage en irrigation, à la genèse des crues extrêmes, à l'impact des périodes de sécheresse et à l'influence de la gestion des sols sur les échanges sol - sous-sol - plante - atmosphère.

Un enjeu scientifique central est d'arriver à une compréhension suffisante de l'influence des différentes caractéristiques des sols et des milieux cultivés (états de surface, discontinuités d'origine anthropique, occupation du sol) sur la genèse et le contrôle des flux qui y circulent. C'est une condition importante pour pouvoir proposer un schéma de fonctionnement permettant une prévision réaliste des flux en bassin cultivé. L'enjeu est majeur puisque, même en milieu « naturel », les modélisations hydrologiques existantes peinent toujours à représenter les écoulements sans un étalonnage complexe. Une des raisons à cela est une mauvaise compréhension du couplage temporel et spatial entre flux de surface, flux souterrains et apports atmosphériques.

Aussi, au travers de l'analyse de l'influence de la variabilité naturelle et des hétérogénéités des sols issues de l'anthropisation, il est important de coupler les différents flux. Une telle analyse systémique est d'autant plus nécessaire qu'elle est aussi un préalable à l'étude du transfert de solutés réactifs, qui implique une connaissance la plus exacte possible des matrices poreuses traversées, et donc des chemins réels de l'eau. Dans les bassins anthropisés, la connaissance des processus physiques doit être alliée à l'analyse des pratiques, en particulier des pratiques d'irrigation et de leurs déterminants. La nature des sols constitue l'un des déterminants essentiels à prendre en compte.

Les enjeux agricoles et environnementaux autour des ressources en sol et en eau se manifestent à l'échelle de territoires ruraux de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres carrés alors que les actes techniques influant ces ressources s'exercent à l'échelle locale de la parcelle agricole. Cependant, les études de compréhension et de modélisation des processus hydrologiques se limitent à des champs spatiaux de taille réduite (parcelles, bassins versants élémentaires) en raison des coûts expérimentaux élevés qu'elles impliquent. En conséquence, elles ne peuvent prendre en compte qu'une part limitée de la variabilité totale des sols et des territoires ruraux et sont difficilement applicables sur l'ensemble d'un territoire rural. Cela nécessiterait que les paysages cultivés, qui caractérisent les territoires envisagés, soient pris en compte comme objet d'étude spécifique. Ces paysages cultivés sont issus de l'interaction au cours du temps de facteurs naturels (lithologie, tectonique, sols, paléoclimats, ancienne végétation, etc.) et d'actions anthropiques (pratiques culturales, aménagement, voirie, etc.). Ils doivent faire l'objet d'analyses et de modélisations spécifiques qui rendent compte de leur organisation spatiale et de leur évolution, tout en se prêtant à des couplages effectifs avec les modèles hydrologiques.

L'ensemble des recherches en cours devrait permettre de mieux prévoir l'évolution de la qualité des sols liée au fonctionnement hydrologique et aux actions anthropiques (érosion, contamination, matière organique, salinisation, etc.). Cette meilleure connaissance passe aussi par la conception de dispositifs pérennes d'évaluation et de suivi de l'impact des pratiques sur les ressources en eau et en sol.

**Sami Bouarfa (UMR G-EAU)
Yves Le Bissonais (UMR LISAH)
et Stéphane Follain (UMR LISAH)**

Les sols régulent l'écoulement des eaux continentales

Les principales équipes

BRGM Montpellier
Service Géologique Régional
Languedoc-Roussillon
26 scientifiques
Directeur : Marc Audibert,
m.audibert@brgm.fr
www.brgm.fr

CMGD
Centre des Matériaux
de Grande Diffusion
(EMA)
24 scientifiques
Directeur par intérim : Yannick Vimont,
Yannick.Vimont@ema.fr
www.ema.fr/CMGD/index.html

LMGC - UMR
Laboratoire de Mécanique et Génie civil
Équipe « Couplages en Milieux
Hétérogènes » (CMH)
(UM2, CNRS)
6 scientifiques
Responsable de l'équipe CMH :
Moulay ElYoussefi, elyous@lmgc.univ-montp2.fr
www.lmgc.univ-montp2.fr

UMR G-EAU
Gestion de l'eau, acteurs et usages
(AgroParisTech/Engref, Cemagref, CIHEAM/IAM.M,
Cirad, IRD, Montpellier SupAgro)
78 scientifiques
Directeur : Patrice Garin,
patrice.garin@cemagref.fr
www.g-eau.net

UMR LISAH
Laboratoire d'étude des Interactions Sol,
Agrosystème et Hydrosystème
(Inra, IRD, Montpellier SupAgro)
70 scientifiques
Directeur : Marc Voltz,
voltz@supagro.inra.fr
www.umn-lisah.fr

... suite page 18

Étude de l'hydrologie des sols et des milieux cultivés

Le *Laboratoire d'étude des Interactions entre Sol, Agrosystème et Hydrosystème* (UMR LISAH, Inra, IRD, Montpellier SupAgro) a pour thématique centrale de recherche l'étude de l'hydrologie des sols et des milieux cultivés. Ses objectifs spécifiques sont de :

- développer les connaissances sur l'érosion des sols, les transferts d'eau et de matière et le devenir de substances polluantes (pesticides et métaux) dans les sols et les bassins versants ruraux en relation avec leur organisation spatiale et leur évolution temporelle ;
- élaborer des outils permettant de diagnostiquer et prévenir les risques qu'induisent les activités humaines dans les milieux cultivés sur les régimes hydrologiques et l'évolution des ressources en eau et en sol ;
- contribuer à la définition de nouveaux modes de gestion durable des sols et de l'espace rural ;
- former des étudiants aux concepts et aux outils d'analyse et de modélisation de l'organisation spatiale et de l'hydrologie des milieux cultivés.

La démarche scientifique du LISAH repose à la fois (i) sur des études et expérimentations hydrologiques de terrain, (ii) des recherches méthodologiques pour l'acquisition et le traitement des données spatialisées concernant le sol et le paysage, ainsi que (iii) sur le développement

d'approches de modélisation hydrologique distribuée permettant de représenter les hétérogénéités spécifiques des paysages ruraux. Le LISAH gère l'observatoire de recherche en environnement OMERE (Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau) qui a pour objectif l'analyse de l'impact des actions anthropiques sur l'érosion physique et chimique des sols méditerranéens et sur la qualité de l'eau.

Le laboratoire, qui regroupe des compétences en science du sol, hydrologie et agronomie, est structuré en trois équipes de recherche :

- Eau et polluants en bassins versants cultivés ;
- Érosion et transport solide ;
- Organisation spatiale et fonctionnement des paysages cultivés.

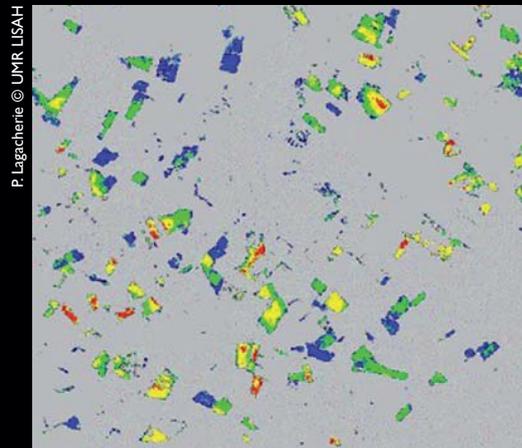
Le LISAH est implanté en France (campus agronomique de la Gaillarde, Montpellier) et dans plusieurs pays méditerranéens et africains (Kenya, Maroc, Syrie, Tunisie), en collaboration avec des institutions de recherche et d'enseignement supérieur agronomique de ces pays : Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (Rabat), *Arabic Center for the Studies of Arid zones and Dry lands* (Damas), Institut national de recherche du génie rural et des eaux et forêts et Institut national agronomique (Tunis), *World Agroforestry Center*

Déterminer la variabilité des propriétés des sols pour la modélisation de leur fonctionnement

Des modèles environnementaux sont utilisés pour comprendre et prédire les écoulements des eaux continentales. Ces modèles nécessitent de connaître avec précision comment varient les propriétés des sols sur les espaces concernés (bassins versants de rivières et de fleuves, bassins de production agricole, unités administratives). À l'échelle française, voire mondiale, les informations fournies par les cartes pédologiques classiques sont souvent trop rares ou imprécises pour satisfaire cette demande. Une réponse pourrait venir des méthodes de cartographie numérique des sols qui réduisent les coûts, augmentent la précision et accélèrent la progression des superficies couvertes. Il s'agit à terme de fournir aux scientifiques de l'environnement des images exhaustives et précises (résolution inférieure ou égale à 100 m) des propriétés fonctionnelles des sols.

La cartographie numérique des sols s'appuie sur des variables paysagères connues pour être reliées aux sols et à leurs propriétés (relief, lithologie, occupation du sol,...), et pour être disponibles sur de vastes superficies. Ces variables sont nécessairement associées entre elles, ainsi qu'aux variables pédologiques existantes sur les zones d'études considérées (cartes pédologiques, profils, analyses de sol). Des procédures mathématiques appropriées sont développées dans ce but.

La cartographie numérique des sols aborde aujourd'hui une nouvelle phase avec l'essor récent des outils géophysiques de mesure des propriétés des sols (résistivimétrie, induction électromagnétique, gamma-radiométrie, sismique réfraction...) embarqués sur des engins motorisés ou aéroportés ou encore des satellites (images à très haute résolution par pixy, imagerie hyperspectrale aéroportée et satellitale, gamma-radiométrie aéroportée). Ainsi, des données quantitatives sur les sols sont désormais disponibles en grande quantité sur des superficies conséquentes (cf. l'exemple de données hyperspectrales



Taux d'argile à la surface du sol estimée à partir d'une image hyperspectrale aéroportée (HYMAP).

Ces estimations ne sont possibles que sur les surfaces nues.

développé ci-contre par les UMR LISAH et TETIS). De nouvelles procédures informatiques sont en cours de développement, d'une part pour optimiser les estimations de propriétés des sols à partir du signal produit par les capteurs et d'autre part pour produire des estimations exhaustives de propriétés de sol à partir des zones renseignées par les capteurs.

**Contacts : Philippe Lagacherie, lagache@supagro.inra.fr
Jean Stéphane Bailly, bailly@teledetection.fr
Cécile Gomez, gomez@supagro.inra.fr**

(Nairobi). Les principaux partenariats du LISAH concernent à la fois la communauté scientifique nationale (p. ex. l'Institut Languedocien sur l'Eau et l'Environnement à Montpellier) et au niveau international, une grande partie des pays de la zone méditerranéenne.

Les principaux chantiers de recherche concernent l'étude des impacts de l'agriculture en viticulture languedocienne et bananeraie antillaise sur la pollution des sols et des eaux par les produits phytosanitaires, l'analyse du cycle hydrologique du système sol-cultures à l'échelle des petits bassins versants méditerranéens, le développement de méthodes de cartographie numérique des sols et de systèmes d'information pédologique, l'analyse du déterminisme et des processus d'érosion des sols et du transfert de

sédiments dans les bassins versants, ainsi que l'étude de l'influence des aménagements hydrauliques (fossés, banquettes, lacs collinaires) sur le fonctionnement hydrologique des sols et bassins versants cultivés.

Hydrosystèmes : leurs usages et gestion

L'UMR *Gestion de l'eau, acteurs et usages* (G-EAU, AgroParisTech/Engref, Cemagref, CIHEAM/IAM.M, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro), créée depuis le 1er janvier 2005, a pour objectifs de recherche de :
■ produire des connaissances sur le fonctionnement des hydrosystèmes, leurs usages et leur gestion ;
■ proposer des méthodes, des outils et des expertises pour les décideurs publics et les groupements de producteurs agricoles ;

■ former des étudiants et des professionnels du Nord et du Sud.

L'UMR intervient de manière équilibrée, en France et à l'international, avec une stratégie prioritaire sur le Maghreb et sur trois grands bassins versants : Niger, Limpopo (Afrique du Sud) et Mékong (Asie du Sud-Est).

L'unité regroupe de nombreuses disciplines au sein de trois axes qui structurent son activité de recherche :
■ *Axe 1 : De la gestion opérationnelle à l'analyse de scénarios d'allocation des ressources.* Cet axe s'intéresse à la maîtrise des flux d'eau aux différentes échelles de temps dans des systèmes qui combinent l'usage de nappes, de canaux, de rivières ou de barrages. Le cœur des compétences de l'UMR porte sur l'analyse du fonctionnement ...

Zonage départemental du risque « Érosion des sols » dans l'Hérault

© Ecole des Mines d'Alès



Inondation à Sommières
en septembre 2002

La loi du 30 juillet 2003 (n°2003-699) veut mettre en œuvre des mesures de lutte contre l'érosion des sols. Le décret n°2005-117 (12 février 2005) précise la nécessité de « réaliser un zonage des risques d'érosion » sous la responsabilité des préfets. La multiplication récente

d'essais de zonage par des organismes publics ou privés pose le problème de l'harmonisation et de la fiabilité des méthodes.

Le BRGM et l'UMR LISAH ont défini un cahier des charges pour établir un zonage de l'aléa « érosion » à l'échelle départementale. La méthodologie élaborée par l'Inra visait à cartographier le risque « Érosion des sols » sur l'ensemble du territoire français (échelle 1/1.000.000, modèle MESALES). Plusieurs étapes ont été nécessaires :

- Une synthèse a défini le contexte général légal et technique (approches de modélisation existantes) ;
- Une étude technique a défini la structure et la paramétrisation les plus adaptées en s'appuyant sur deux cas tests déjà documentés : les départements de l'Oise et de l'Hérault (France).

Une série de tests de sensibilité a permis d'optimiser la paramétrisation du modèle MESALES dans l'optique d'un zonage à l'échelle départementale. Les tests ont vérifié les apports et la pertinence :

- d'une amélioration de la résolution du modèle numérique de terrain (MNT) ;

- d'une amélioration du critère « pente » en prenant en compte l'aire drainée (brute ou pondérée par l'occupation du sol, modèle STREAM) ;
- d'une carte des sols validée à l'échelle régionale (1/250.000, base de données « Sols ») pour calculer les paramètres « érodibilité » et « battance » ;
- de données pluviométriques adaptées au contexte local.

Une validation a ensuite été réalisée par des conseillers agricoles (Chambre Départementale d'Agriculture) et des agronomes pédologues (UMR LISAH).

En conclusion, il est nécessaire de prendre en compte la carte des pentes calculées à l'aide du MNT de l'institut géographique national (IGN) 50m pondérées par l'aire drainée ruisselante (prise en compte pour un pixel donné de l'impluvium et de l'occupation du sol sur cet impluvium). La carte des pentes issue d'un MNT IGN 250 m a été substituée par la battance et l'érodibilité cartographiées à l'échelle régionale (1/250.000) à partir de la base de données « Sols » (Inra).

Les données pluviométriques moyennes annuelles ne conviennent pas au contexte cévenol car elles sous-estiment les événements à forte intensité. La réalisation par l'Université de Montpellier 2 d'une cartographie des pluies journalières maximales avec des périodes de retour variables a permis d'intégrer la carte avec une période de retour de 2 ans qui, après validation, est la plus compatible avec la problématique « érosion agricole ».

**Contacts : Jean-François Desprats, jf.desprats@brgm.fr
Yves Lebissonais, lebisson@supagro.inra.fr**

des systèmes aménagés et les manœuvres d'ouvrages pour respecter des consignes d'allocation d'eau. Les principales disciplines concernées sont l'hydrologie, l'hydrogéologie, l'hydraulique, l'hydrobiologie, l'automatique et l'informatique.

■ **Axe 2 : Concertations pour l'eau, politiques publiques et gestion des services.** Cet axe réunit les travaux d'évaluation des politiques publiques de l'eau en interaction avec les autres politiques (sectorielles ou d'aménagement du territoire) sur les institutions et les modes de régulation des usages de l'eau, les outils économiques ou informationnels de gestion des services d'eau. Les enjeux abordés concernent le partage de la ressource et l'accès aux services d'eau et d'assainissement, la qualité des milieux aquatiques et la vulnérabilité aux risques liés à l'eau

(sécheresse, inondation). L'UMR aborde ces questions grâce à des modèles élaborés en interaction avec les acteurs, sous forme informatique ou non (sociologie expérimentale, modélisation d'accompagnement, économie expérimentale). Les principales disciplines impliquées relèvent des sciences humaines et sociales : économie, gestion, sociologie, sciences politiques, géographie, anthropologie, auxquelles s'ajoutent des compétences en modélisation des systèmes complexes et les expertises des sciences du vivant et des sciences de l'ingénieur pour la conception des modèles.

■ **Axe 3 : Pratiques et usages de l'eau.** Cet axe regroupe les travaux dédiés au comportement des usagers et de leurs déterminants (dans le domaine de l'eau agricole), à la performance des systèmes de production agricole et des matériels

d'irrigation (en particulier leurs effets sur l'environnement) et à la mise au point d'innovations pour ces systèmes agricoles. Des travaux de modélisation et d'expérimentation sur les sols sont développés, en particulier vis-à-vis de leurs capacités de transfert d'eau et de polluants dans différents systèmes irrigués dans le monde et sous différentes pratiques. Des travaux de métrologie pour le développement d'innovations pour la mesure des états hydriques du sol sont réalisés à Montpellier au laboratoire et en station expérimentale. Des disciplines des trois pôles du triptyque « anthroposphère-technosphère-biosphère » sont impliquées dans cet axe : mécanique des fluides, physique des sols, métrologie, agronomie, économie, sociologie, anthropologie.

Un quatrième axe est dédié aux activités de formation.

Suivi de l'état hydrique des sols et évaluation des innovations techniques en irrigation

L'agriculture irriguée contribue à satisfaire les besoins alimentaires croissants à l'échelle mondiale. Face à une ressource en eau limitée, elle doit cependant accroître son efficacité.

Les recherches conduites depuis près de 20 ans sur la station expérimentale de Lavalette (Montpellier) ont permis de construire des méthodes et outils d'évaluation des systèmes d'irrigation dans différents contextes de grandes cultures, en particulier pour l'irrigation gravitaire. Les nouveaux matériels disponibles conduisent à réexaminer la technique de l'irrigation goutte à goutte enterrée qui permet de réduire fortement les consommations en eau (25% selon certaines évaluations) et les pertes d'azote. Considérée comme une alternative potentielle aux autres équipements pour les grandes cultures, il est nécessaire d'évaluer ses performances et sa viabilité. Dans le cadre de la réhabilitation hydraulique de la station expérimentale menée avec l'appui des collectivités publiques, un dispositif pérenne a été mis en place pour comparer différentes modalités d'irrigation localisée et modes de conduite.

La caractérisation de l'état hydrique du sol dans la zone racinaire par des méthodes de mesure classiques (humidimétrie neutronique, gammamétrie et tensiométrie) couplées à des mesures diélectriques continues permet d'analyser les flux à différents pas de temps. Les premières observations complétées par celles de la culture confirment l'intérêt de cette technique. Parallèlement à la poursuite des expérimentations, la modélisation des transferts selon différentes approches est

Développement d'outils et de méthodologies à la disposition des décideurs

L'établissement du BRGM Montpellier est composé de scientifiques relevant du Service géologique régional Languedoc-Roussillon, de l'unité Eau/RMD (Eau /évaluation de la Ressource, Milieux Discontinus et de l'unité ARN/ESL (ARN/ Érosion des Sols et Littoral).

Les activités de recherche et de service public visent à mettre à la disposition des décideurs, que ce soit au niveau régional, national ou international, des outils et méthodologies dans les domaines suivants :

- Cartographie géologique : gestion de la banque du sous-sol, diffusion de l'information géologique et cartographie numérique harmonisée entre les départements, patrimoine géologique ;
- Eau : suivi quantitatif des eaux souterraines à travers les réseaux piézométriques, suivi qualitatif par la

surveillance de la physico-chimie et des teneurs en pesticides, chlorures, etc., atlas hydrogéologiques, détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines, caractérisation et évaluation des ressources en eau des systèmes karstiques, rôle des eaux souterraines en milieu karstique dans la genèse des crues ;

- Risques naturels : inventaires départementaux des mouvements de terrain, gestion du risque « mouvement de terrain » appliquée aux réseaux routiers, cartographie départementale de l'aléa « retrait-gonflement des argiles », inventaires départementaux des cavités souterraines, risque sismique avec l'appui à la mise en œuvre du plan national de prévention du risque sismique « Plan séisme » ;

- Sites et sols pollués : inventaire des anciens sites ayant eu une activité potentiellement polluante, base de données relative à la qualité des eaux souterraines en aval des installations classées ;

- Ressources minérales et déprise minière : schémas « Littoral » (suivi du littoral, risques côtiers liés au changement climatique) ;



Caractérisation hydrodynamique d'un sol par la méthode Beerkan

mise en œuvre pour étendre les résultats à d'autres contextes pédoclimatiques, en liaison avec les opérateurs économiques. Les activités de la station expérimentale constituent une plateforme de recherche et de formation sur les cultures irriguées durables pour l'UMR G-EAU, en lien avec Agropolis International et d'autres équipes de recherche du Nord (notamment le laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement - CNRS) et du Sud (en particulier au Maghreb).

Contacts : Pierre Ruelle, pierre.ruelle@cemagref.fr
Jean-Claude Mailhol, jean-claude.mailhol@cemagref.fr

- Énergie : potentiel géothermique, stockage d'énergie sur nappes phréatiques.

Le thème de recherche « Inondation » vise à apporter la dimension « sol et sous-sol » dans cette problématique qui s'appuie localement sur les actions menées avec le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, que ce soit sur les crues rapides (bassin versant du gardon d'Anduze) ou pour la caractérisation des crues en milieu karstique (Nîmes, Lez, etc.). Ces actions font appel à des partenariats scientifiques (UMR HYDROSCIENCES Montpellier, École des Mines d'Alès) et techniques (Service de prévention des crues Grand Delta et Méditerranée Ouest).

Le thème de recherche « Érosion des sols » est mené en étroite collaboration avec les équipes du BRGM d'Orléans. Des collaborations à travers différents projets ont été mises en place avec l'UMR LISAH, l'Inra (Orléans), l'IRD (Tunis) et la Chambre d'agriculture de l'Hérault. ...



Efflorescence saline au bord du puits

Autres équipes concernées par ce thème

LGEI

Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel et des risques industriels et naturels (EMA)

20 scientifiques

Directeur : Miguel Lopez-Ferber, Miguel.lopez-ferber@ema.fr
<http://ema.fr/LGEI>

UMR CEFE

Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CNRS, UMI, UM2, UM3, Montpellier SupAgro, Cirad, EPHE)

72 scientifiques

Directeur : Jean-Dominique Lebreton, direction@cefe.cnrs.fr
www.cefe.cnrs.fr

UMR SYSTEM

Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens

(Cirad, Inra, Montpellier SupAgro)

22 scientifiques

Directeur : Jacques Wery, wery@supagro.inra.fr
<http://umr-system.cirad.fr/>

UPR

Risque environnemental lié au recyclage (Cirad)

25 scientifiques

Directeur : Hervé Saint Macary, herve.saint_macary@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/recyclage_risque

UPR

Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantation (Cirad)

15 scientifiques

Directeur : Jean-Pierre Bouillet, jean-pierre.bouillet@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/ecosystemes_plantations

US

Analyse des eaux, sols et végétaux (Cirad)

17 scientifiques

Directeur : Alain Aventurier, alain.aventurier@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/analyses

UMR EMMAH

Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (Inra, UAPV)

37 scientifiques

Directrice : Liliana Di Pietro, dipietro@avignon.inra.fr
www.avignon.inra.fr/les_recherches_1/liste_des_unites/emmah_environnement_mediterraneen_et_modelisation_des_agro_hydrosystemes

Gestion de la salinité dans les périmètres irrigués : l'oasis de Fatnassa en Tunisie

La salinisation consiste en une augmentation progressive de la concentration de sels dans les sols sous l'influence d'apport d'eau d'irrigation plus ou moins salée et de conditions hydrologiques particulières : climat aride, proximité de la nappe, lessivage insuffisant, etc. Ce phénomène affecterait 77 millions d'hectares, soit 28% des terres irriguées, dont 8% seraient sévèrement affectées. Des valeurs excessives de la salinité pénalisent les exploitations agricoles en réduisant les rendements, en rendant des sols inaptes à certaines cultures sensibles ou en accroissant les coûts de production. Les régions arides du sud de la Méditerranée sont singulièrement exposées au risque de salinisation. L'UMR G-EAU et l'Institut National de Recherche du Génie Rural des Eaux et Forêts tunisien abordent le problème de la gestion de la salinité dans le cadre du projet SIRMA (Économie d'Eau dans les Systèmes Irrigués au Maghreb) sur l'oasis de Fatnassa en Tunisie. Le premier axe de recherche vise à comprendre la nature des processus afin d'identifier les causes sur lesquelles il semble possible d'agir et de faire la part entre les processus opérant à l'échelle du système hydraulique et de la parcelle.

Ce premier axe repose sur la mesure et la modélisation des processus biogéochimiques et des bilans hydriques et salins en fonction des flux aux frontières de l'oasis (irrigation, drainage, écoulement naturel de la nappe et évapotranspiration) et des conséquences sur les tendances évolutives de la salinité des sols. Le second axe vise à comprendre les adaptations des agriculteurs et les performances des systèmes de production vis-à-vis de la salinité, de la fertilité des sols et des contraintes hydriques. Cet axe de recherche procède d'une triple analyse : (i) de la perception des contraintes et des pratiques des agriculteurs ; (ii) du fonctionnement du périmètre intégrant la gestion collective du système hydraulique, les stratégies et pratiques individuelles, les états du milieu ainsi que les performances des cultures ; et (iii) de l'élaboration du revenu des agriculteurs.

Contacts : Serge Marlet, marlet@cirad.fr
Sami Bouarfa, sami.bouarfa@cemagref.fr

Pour plus d'informations, www.eau-sirma.net



« Eau morte » (eau salée) dans un puits creusé par les agriculteurs pour irriguer leur culture

Modélisation du comportement mécanique des sols et des transferts de matières

Les travaux de l'équipe **Couplages en Milieux Hétérogènes (CMH) du Laboratoire de Mécanique et Génie civil** (LMGC, UM2, CNRS) concernent en grande partie les sols. Les modélisations développées abordent le comportement mécanique des sols et les transferts de matière ainsi que le couplage entre ces deux aspects. Ils sont abordés avec divers outils théoriques : thermodynamique et mécanique macroscopique, méthodes de changement d'échelles (homogénéisation et mécanique des milieux granulaires).

Les thèmes de recherche concernant les sols sont les suivants :

- Équilibre thermodynamique de l'eau et d'éléments dissous dans un sol ;
- Évaporation, condensation, dissolution dans les sols hygroscopiques ;
- Transfert d'eau dans les sols à faible teneur en eau au voisinage de l'interface sol-atmosphère ;
- Dépollution des sols par ventilation ;
- Thermo-hydro-dynamique des sols ;
- Approche des couplages par changement d'échelle : homogénéisation et mécanique des milieux granulaires.

Des travaux ont été menés sur le transfert hydrique à la surface du sol en zone aride dans le cadre d'un programme de coopération pour la recherche universitaire et scientifique (CORUS) du ministère des Affaires étrangères et européennes, en collaboration avec l'université de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso) et l'Inra (Science du sol). Les travaux actuels sur la dépollution des sols sont réalisés en collaboration avec l'université de Ouagadougou (Burkina Faso). Le point le plus novateur de ces deux programmes est la prise en compte du changement de phase liquide-gaz dans la couche superficielle de sol.

Modélisation du comportement mécanique des matériaux et des relations « pluie/débit »

L'École des Mines d'Alès (EMA) comprend trois laboratoires : le Laboratoire Génie de l'environnement industriel et des risques industriels et naturels (LGEI), le **Centre des Matériaux de Grande Diffusion (CMGD)** et le Laboratoire de génie informatique et ingénierie de production (LGI2P).

Les activités du CMGD s'intéressent à des matériaux de la vie quotidienne du XXI^e siècle, principalement les

polymères et matériaux composites et les matériaux de construction pour le génie civil. Deux équipes composent le pôle génie civil : l'équipe « Milieux divisés et matériaux minéraux complexes » et l'équipe « Géo-mécanique et hydrologie ». Cette dernière équipe s'intéresse à la problématique des sols, avec deux axes de recherche : la modélisation du comportement mécanique des matériaux en blocs ou en grains, et la modélisation des relations « pluie/débit » par différentes approches (réseaux de neurones d'une part et système d'automates séquentiels d'autre part) sur des bassins versants dont la taille va du km² à plusieurs centaines de km². Les réseaux de neurones ont comme données d'entrée des images radar de pluie, tandis que celles des automates séquentiels sont des valeurs enregistrées par des pluviomètres.

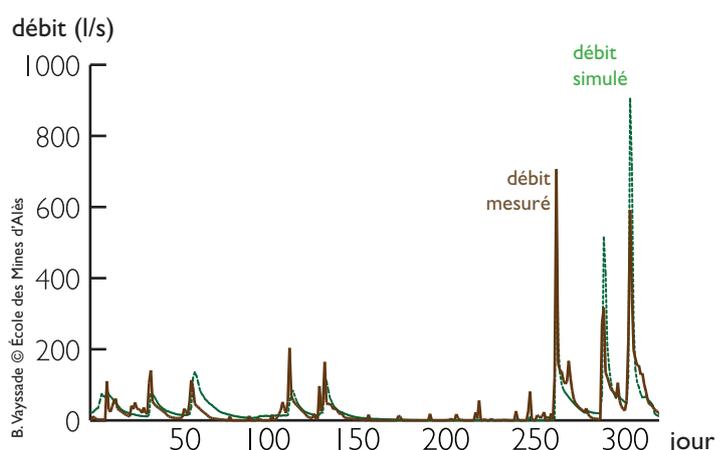
Les logiciels nécessaires à l'équipe « Géo-mécanique et hydrologie » sont conçus sur mesure à l'EMA, mais pas nécessairement dans l'équipe. Les mesures proviennent de partenariats avec le CNRS (UMR ESPACE, Université de Nice Sophia Antipolis), le Service Central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations, l'Université Charles de Prague, etc. ■

Modélisation du bilan hydrique d'un bassin versant de rivière de montagne

L'École des Mines d'Alès (EMA), l'UMR ESPACE (CNRS, université de Nice Sophia Antipolis) et d'autres partenaires européens (en République Tchèque, Allemagne et Espagne) ont développé un outil de simulation des écoulements fluviaux dans le cadre du projet LOWRGREP (*Land-use Optimisation With Regards to Groundwater REsources Protection in the mountain hardrock areas*) du 5^e Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD) de l'Union européenne. L'objectif de ce projet était d'évaluer le degré d'interférence des activités anthropogéniques avec l'hydrosphère de différentes zones de montagne.

Des courbes de débit ont été mesurées (UMR ESPACE, Université de Nice / CNRS) et simulées (EMA) sur un bassin versant d'environ 1 km² situé sur le Mont Lozère (France). La modélisation a été faite à l'aide d'automates séquentiels à pas de temps journalier. Le débit de la rivière est considéré comme la somme de trois apports : le ruissellement instantané lors d'une journée de pluie, le ruissellement hypodermique qui s'étale sur plusieurs jours et l'apport d'une nappe sur toute l'année. On constate que les pics de crue simulés sont synchrones à la réalité mais que leurs amplitudes restent à améliorer.

L'intérêt de cet outil de simulation est de permettre d'envisager différents scénarios de modification anthropique ou climatique



Courbes de débit mesuré et simulé sur un bassin versant d'environ 1 km². Bassin versant de La Sapine, Mont Lozère, France.

et d'observer leur impact aussi bien au niveau de la nappe que de la rivière. Par exemple, une simulation sans ruissellement hypodermique montre une décrue dès le lendemain de l'épisode pluvieux. Cette simulation, même rustique, montre ainsi que les sols régulent l'écoulement des eaux continentales.

Contact : Bernard Vayssade, bernard.vayssade@ema.fr



Christophe Maitre © Inra

*Paysage agricole bien aménagé
dans la vallée de la Dordogne (France)*

Les sols régulent *les cycles biogéochimiques* des éléments nutritifs *et des polluants*

Le sol, principal réservoir d'éléments minéraux essentiels à la vie dans les écosystèmes terrestres, constitue le support de la production primaire (voir le chapitre 1). Au-delà de la production de biomasse (en termes quantitatifs), la biodisponibilité des éléments nutritifs conditionne également la qualité de la biomasse produite, au travers, par exemple, de la teneur en protéines et en éléments minéraux des denrées alimentaires issues de l'agriculture. La gestion parcimonieuse de ces éléments minéraux a de tout temps constitué un des fondements de la « durabilité » de la production agricole. Des apports excessifs de fertilisants peuvent conduire à des impacts négatifs sur l'environnement. Par exemple, l'azote, nutriment majeur pour les plantes, est aussi une source de « polluants » via le transfert vertical dans le sol (lixiviation) de nitrate en excès vers les nappes phréatiques ou via les émissions de protoxyde d'azote, un gaz qui constitue un important contributeur à l'effet de serre. L'excès de phosphore dans les sols peut conduire, suite à son transfert par le jeu de l'érosion, à des phénomènes d'eutrophisation des eaux de surface. La gestion de la fertilité des sols est à ce titre le premier enjeu majeur identifié des recherches sur les « sols, supports des cycles biogéochimiques ».

Le sol forme de nombreuses interfaces avec les organismes de la biosphère continentale, en particulier les plantes via leurs racines, avec l'atmosphère pour les échanges gazeux et avec l'hydrosphère pour les échanges hydriques (voir le chapitre 2). Les flux à ces interfaces sont au cœur des cycles biogéochimiques et sont largement déterminés par les propriétés physiques et chimiques du sol, mais aussi par divers acteurs biologiques. Les sols hébergent en effet une grande diversité d'organismes (microorganismes, animaux et végétaux) dont la plupart sont responsables de processus de biotransformation et de transfert des éléments ou composés. Au travers de ses acteurs vivants (voir le chapitre 4), le compartiment « sol » joue un rôle complexe de régulation des cycles biogéochimiques. Ainsi, le sol constitue l'un des principaux réservoirs de carbone au niveau de la biosphère, ses formes organiques étant la principale source d'énergie pour les nombreux organismes hétérotrophes.

Les matières organiques jouent de multiples fonctions. En particulier leur dynamique est au centre de la problématique du stockage du carbone et de l'effet de serre via la régulation des émissions de gaz à fort pouvoir radiatif issus de sa décomposition (gaz carbonique, méthane, oxydes d'azote).

Le sol recèle également des éléments potentiellement toxiques présents dans les matériaux parentaux dont les sols sont issus. Il est aussi le réceptacle de divers composés résultant de l'exploitation des écosystèmes terrestres (résidus agricoles, industriels ou urbains, amendements minéraux et organiques) ainsi que divers autres intrants (métaux, métalloïdes, pesticides et autres xénobiotiques). Ces composés peuvent également subir des processus de transfert et de transformation (minéralisation, changements de forme physique ou chimique / spéciation). Le sol joue à cet égard un rôle important de filtre physique mais aussi de bio-réacteur complexe, impliqué dans la dépollution des écosystèmes terrestres (pouvoir épurateur). Comprendre le devenir des divers contaminants constitue un autre enjeu majeur des recherches sur les « sols, supports des cycles biogéochimiques ». Le sol est ainsi au cœur des questions de diagnostic environnemental et de réhabilitation de sites pollués.

Les recherches sur les sols menées par les équipes d'Agropolis International portent principalement sur les écosystèmes méditerranéens et tropicaux, plus ou moins anthropisés, et abordent, outre les questions développées plus haut, les problématiques liées à l'impact sur les sols des changements globaux (changements climatiques et changements d'usage des terres). Les études réalisées dans ce cadre reposent sur la maîtrise d'outils d'analyse physico-chimique et biologique ainsi que d'outils numériques (modélisation utilisée à la fois comme outil de recherche et comme outil de prédiction), mais aussi sur des sites ou chantiers instrumentés tels que la plate-forme Ecotron de Baillarguet ou le site forestier de Puéchabon (Hérault, France).

**Nathalie Fromin (UMR CEFE)
et Philippe Hinsinger (UMR Eco&Sols)**

Les sols régulent les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs et des polluants

Étude des impacts anthropiques sur l'environnement : les transferts de polluants

Les activités du *Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel et des risques industriels et naturels* (centre de recherche LGEI, EMA) se concentrent sur l'étude des impacts anthropiques (industriels, urbains, agricoles) sur l'environnement, notamment les transferts de polluants via des vecteurs tels que l'eau, l'interface eau/sol et l'air. Il est important, en effet, de pouvoir évaluer les perturbations liées aux activités anthropiques sur les cycles biogéochimiques qui régissent les écosystèmes aquatiques et terrestres.

De manière plus spécifique, les matrices solides (sols, sédiments) et les phénomènes qui s'y déroulent ont une grande influence sur la qualité des eaux. L'étude de la matière organique de ces milieux solides est nécessaire pour estimer son impact sur l'environnement aquatique. Il est connu que certains polluants (hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP] p.23) sont mobilisés dans des fractions hétérogènes (matières en suspension, colloïdes, matière organique). Ainsi, la caractérisation de ces fractions hétérogènes est primordiale pour une bonne compréhension des phénomènes gouvernant le devenir de ces polluants. Certaines de ces fractions constituent un stock de polluants potentiellement remobilisables, en particulier lors de crues, qui peuvent engendrer des impacts environnementaux

et sanitaires non négligeables. Le LGEI a développé une méthode de caractérisation, simple et rapide, de la matière organique dans les sols et les sédiments fondée sur une extraction assistée par ultrasons à l'aide de différents solvants, suivie d'une détection par spectrophotométrie UV-Visible. La complémentarité des compétences du LGEI et du Centre des Matériaux de Grande Diffusion (CMGD) ainsi que le potentiel analytique commun offre un large éventail de possibilités pour la caractérisation de ces fractions et macromolécules (substances humiques, etc.).

Le centre LGEI développe également (i) des capteurs physico-chimiques permettant de mesurer le niveau de contamination engendré par certains polluants (nitrate, détergents, HAP, pesticides, etc.) et (ii) des systèmes fondés sur la biodétection pour évaluer la concentration et/ou l'effet de certains xénobiotiques. Il s'intéresse aussi à la gestion territoriale des risques et des crises d'origine naturelle. Les travaux de recherche sont axés sur la modélisation (développement d'outils de prévision opérationnelle), l'élaboration de concepts et méthodes en vue d'évaluer la vulnérabilité et l'exploitation des outils de la géomatique pour permettre l'analyse spatiale des territoires étudiés et optimiser la prévision, la prévention et la gestion de crise.

Dans ce cadre, l'étude des sols, notamment de leur perméabilité, se révèle fondamentale en particulier pour la mise en place d'outils de prévisions des crues. Des projets de

Les principales équipes

LGEI

Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel et des risques industriels et naturels

(EMA)

20 scientifiques

Directeur : Miguel Lopez-Ferber,
Miguel.lopez-ferber@ema.fr
<http://ema.fr/LGEI>

UPR

Risque environnemental lié au recyclage

(Cirad)

25 scientifiques

Directeur : Hervé Saint Macary,
herve.saint_macary@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/recyclage_risque

US

Analyse des eaux, sols et végétaux

(Cirad)

17 scientifiques

Directeur : Alain Aventurier,
alain.aventurier@cirad.fr
www.cirad.fr/ur/analyses

UMR EMMAH

Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

(Inra, UAPV)

37 scientifiques

Directrice : Liliana Di Pietro,
dipietro@avignon.inra.fr
www.avignon.inra.fr/les_recherches_/liste_des_unites/emmah_environnement_mediterraneen_et_modelisation_des_agro_hydrosystemes

... suite page 24

Diagnostic HAP de sols contaminés



Mallette HAP pour le diagnostic rapide des HAP dans les sols contaminés

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés organiques produits lors de réactions de combustion. Ils peuvent être d'origine naturelle (barbecues, feux de forêts...) ou anthropique (moteurs à explosion, procédés industriels,...). Ces composés sont de ce fait largement distribués dans les sédiments, l'eau, l'air, les plantes et les animaux. Leur présence dans les sols est généralement associée aux activités de production de gaz (cokeries, anciennes usines à gaz), de raffinage du pétrole ou de traitement du bois. De fait, beaucoup de sites industriels sont contaminés par les HAP. Ce sont des polluants majeurs. Une cinquantaine de composés ont été répertoriés ; seize d'entre eux sont considérés comme prioritaires par l'*United States Environment Protection Agency* (USEPA) car ils présentent des propriétés toxiques avérées ainsi que, pour certains, un potentiel cancérigène.

La réhabilitation des sites contaminés débute par un audit environnemental qui requiert un grand nombre d'analyses du fait de l'hétérogénéité de la distribution des polluants dans les sols. Les analyses en laboratoire sont onéreuses et longues. En partenariat avec Total et Secomam (société spécialisée dans la conception et la fabrication d'instruments d'analyse et de contrôle), l'EMA (LGEI) a conçu une méthode simple, rapide, précise et portable pour estimer sur le terrain la concentration en HAP en 20 minutes. Cette méthode est fondée sur l'analyse spectrophotométrique UV d'un extrait organique de sol. La concentration obtenue fait référence aux 16 HAP de la liste de polluants prioritaires de l'USEPA. En outre, un indice de « maturité » renseigne sur la biodégradabilité potentielle des HAP. La gamme de mesure est comprise entre 20 et 2 000 mg par kg.

Contact : Évelyne Touraud, evelyne.touraud@ema.fr

recherche ont été menés en ce sens en collaboration avec d'autres unités de recherche de la région Languedoc-Roussillon (UMR Hydrosociétés Montpellier, BRGM), sur des bassins versants cévenols et nîmois. C'est au travers d'essais de simulation de pluies, visant à caractériser la capacité d'infiltration des sols, que la contribution du centre a été la plus marquée. Ces projets de recherche ont permis d'affiner la prise en compte des sols pour la compréhension, la modélisation et la prévision des crues « éclair ».

Pratiques agricoles et pouvoir épurateur du sol et de la plante

Pour faire face à la demande croissante des populations, l'intensification de l'agriculture —avec l'augmentation de la production agricole et le maintien, voire l'amélioration de sa qualité— font de la gestion des matières organiques brutes ou transformées et des résidus divers un enjeu capital. Le recyclage de ces produits doit garantir la préservation des ressources naturelles (sols, atmosphère, eau) dans des zones où s'exercent de fortes

pressions anthropiques (insulaires, urbaines ou périurbaines) et où ils représentent des sources de pollution potentielles. Ceci est également vrai dans les zones exploitées de façon moins intensive où ces produits ont de tout temps constitué une ressource. Ainsi, pour l'*UPR Risque environnemental lié au recyclage* (Cirad), cet enjeu se traduit par la recherche et la mise au point de pratiques agricoles utilisant au mieux le pouvoir épurateur du sol et de la plante afin de recycler les matières organiques et les déchets tels que les effluents d'élevage et de l'agro-industrie, boues d'épuration, déchets verts et ordures ménagères.

La mise au point et le suivi d'un système de recyclage agricole impliquent (i) la compréhension des déterminants du fonctionnement des exploitations agricoles vis-à-vis des pratiques de recyclage et (ii) la compréhension de l'effet des pratiques agricoles sur les processus de transfert et de transformation des déchets et matières organiques dans les systèmes « sol-plante-atmosphère ».

La parcelle cultivée est une échelle privilégiée pour l'étude des processus biophysiques, tandis que la gestion

intégrée des systèmes de production est abordée au niveau du territoire. Le système « sol-plante » est un objet d'étude central en tant que support de la production agricole, cible des interventions techniques dans le cadre de la conduite de la culture, et site d'accumulation, de transformation et de transport de produits de différentes natures.

Pour être en mesure d'appréhender cette diversité d'échelles et d'approches, l'UPR est amenée à rechercher des situations où (i) la plupart des déchets et matières premières secondaires mentionnés ci-dessus sont produits, (ii) il existe une diversité des milieux sur un territoire limité avec une densité de population forte, (iii) le cadre réglementaire est particulièrement contraignant. Ces caractéristiques ont amené l'UPR à choisir la Réunion comme site atelier principal car il est bien adapté à la mise au point de procédés extrapolables à de nombreuses situations tropicales dans un cadre réglementaire mondial amené à se durcir. En fonction des contextes socio-économiques (partenariat industriel privé) ou de la nature des déchets, d'autres sites expérimentaux ont aussi été retenus. ...

Boues d'épuration, éléments traces métalliques et canne à sucre

L'intérêt économique et agronomique du recyclage des déchets en agriculture n'est plus à démontrer, mais il est fondamental d'en maîtriser l'impact environnemental. Parmi les polluants potentiels impliqués dans ce recyclage, les éléments traces métalliques (ETM) doivent être attentivement surveillés car ils sont pour la plupart toxiques pour le règne animal et végétal.

C'est pourquoi la pratique de l'épandage agricole des boues d'épuration bénéficie en France d'un cadre réglementaire rigoureux dont l'un des principes est la protection contre les risques de contamination des sols et des milieux (écosystèmes, agrosystèmes, eaux continentales). Ainsi, pour limiter le risque lié aux ETM, l'épandage est interdit dans le cas de boues d'épuration trop chargées en ETM ou sur des sols déjà riches en ces éléments.

Sur l'île de la Réunion, de nombreux sols se sont développés sur des matériaux volcaniques qui présentent naturellement des teneurs en nickel, chrome et cuivre supérieures aux valeurs réglementaires. L'épandage des boues ne peut donc être autorisé sur ces sols sans l'obtention d'une dérogation.

Suite à une vaste campagne d'échantillonnage de sols et de cannes à sucre, l'**UPR Risque environnemental lié au recyclage** (Cirad) a étudié, d'une part la mobilité des ETM, c'est-à-dire leur aptitude à passer dans la phase liquide, et, d'autre part, la phytodisponibilité de ces mêmes éléments, c'est-à-dire la quantité d'ETM transférée dans la plante. Ces travaux ont montré que les ETM étudiés étaient très peu mobiles et que les cannes à sucre qui se développaient sur des sols très riches en ETM n'absorbent pas plus de nickel, chrome et cuivre que les cannes qui se développent sur des sols moins riches. Ces résultats permettent d'envisager la demande d'une dérogation, ce qui ouvrirait de nouvelles perspectives de valorisation des boues d'épuration à la Réunion. Ces perspectives sont confortées par le contexte actuel de forte augmentation du coût des engrais.

Contacts :

Emmanuel Doelsche, emmanuel.doelsch@cirad.fr

Gérard Bourgeon, gerard.bourgeon@cirad.fr

Élaboration d'outils d'analyse et de prévision du fonctionnement des agrohydro-systèmes méditerranéens

L'**UMR Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydro-systèmes** (EMMAH) regroupe des chercheurs de l'Inra et des physiciens et des hydrogéologues de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV). Les compétences thématiques et techniques de l'UMR couvrent les domaines suivants :

- Fonctionnement des cultures/agronomie, bioclimatologie et télédétection ;
- Physique des transferts et biogéochimie des sols et des milieux poreux ;
- Hydrogéologie, hydrochimie et hydrologie.

Son objectif est l'élaboration d'outils d'analyse et de prévision du fonctionnement physique, biologique et biogéochimique des agrohydro-systèmes, en particulier méditerranéens, en terme de production agricole, de flux d'eau et de transferts de polluants en considérant un contexte de possibles changements du climat et de l'usage des sols. La démarche scientifique repose, d'une part, sur

des expérimentations conduites à diverses échelles (du réacteur fermé de laboratoire au bassin versant en passant par la colonne et la parcelle) et d'autre part, sur le développement d'outils de modélisation permettant de simuler le fonctionnement des systèmes étudiés.

Pour les activités s'intéressant au sol, les recherches portent sur la modélisation du ruissellement et des phénomènes d'infiltration rapide, sur le déplacement de particules colloïdales minérales ou biotiques (bactéries), sur la prise en compte des couplages entre mécanismes de transport (eau, chaleur, solutés, gaz) et processus biogéochimiques contrôlant le devenir des éléments et composés en solution (nitrate, carbone organique dissous, éléments en traces métalliques). Les outils de simulation développés sont divers : modèle de transfert dans la zone non saturée combinant transport, géochimie et processus biologiques, modèle 3D d'extraction d'eau par des systèmes racinaires, modèles de simulation du développement des cultures, modèles SVAT (transport « sol-végétation-atmosphère »), assimilation de données de télédétection dans les modèles de végétation, modèles pour la simulation du transfert dans les nappes, etc. ...

Autres équipes concernées par ce thème

UMR Eco&Sols

Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols
(IRD, Inra, Montpellier SupAgro)
45 scientifiques
Directeur : Jean-Luc Chotte,
jean-luc.chotte@ird.fr

UMR G-EAU

Gestion de l'eau, acteurs et usages
(AgroParisTech/Engref, Cemagref, CIHEAM/IAM.M, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro)
78 scientifiques
Directeur : Patrice Garin,
patrice.garin@cemagref.fr
www.g-eau.net

UMR LISAH

Laboratoire d'étude des Interactions Sol, Agrosystème et Hydrosystème
(Inra, IRD, Montpellier SupAgro)
70 scientifiques
Directeur : Marc Voltz,
voltz@supagro.inra.fr
www.umr-lisah.fr

UMR SYSTEM

Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens
(Cirad, Inra, Montpellier SupAgro)
22 scientifiques
Directeur : Jacques Wery,
wery@supagro.inra.fr
<http://umr-system.cirad.fr/>

... suite page 26



S. Rambal © UMR CEFE

*Tour de mesure des flux d'énergie, d'eau
et de dioxyde de carbone au-dessus
d'une forêt de chêne vert à Puéchabon, France*

Le bilan de carbone des écosystèmes terrestres

La compréhension du fonctionnement global de notre planète impose de déterminer avec précision les bilans de matière et d'énergie à l'échelle des écosystèmes. La méthode des corrélations turbulentes est un moyen d'accéder en continu aux flux d'énergie, d'H₂O et de CO₂ entrant ou sortant d'un écosystème donné. Cette méthode permet (i) de quantifier l'importance des puits de carbone, (ii) de mettre en évidence les interactions entre cycles de l'eau et de carbone, (iii) de comprendre comment les variables biotiques ou abiotiques contrôlent le fonctionnement du système et (iv) comment les événements extrêmes (p. ex. canicule ou sécheresse sévère) font passer les écosystèmes de l'état de puits à celui de source. La mise en réseau des sites de mesure aux échelles européenne (Carboeurope) et mondiale (Fluxnet) est à l'origine de bilans sur une large gamme d'écosystèmes, depuis les prairies tempérées jusqu'aux forêts amazoniennes.

La tour à flux de Puéchabon (France) fonctionne en continu depuis près de 10 ans. Elle est installée sur un taillis de chêne vert (*Quercus ilex*), espèce emblématique qui couvre plusieurs millions d'hectares sur le pourtour de la Méditerranée. Le site est désormais une référence internationale pour les écosystèmes forestiers méditerranéens à feuillage persistant. En moyenne, le

bilan net annuel est de 290 g C m⁻². L'assimilation brute atteint 1 290 g C m⁻². La respiration de l'écosystème, qui est la somme des respirations autotrophe et hétérotrophe où la composante « sol » prédomine, avoisine 1 000 g C m⁻². Ce terme est très sensible à l'augmentation en cours des températures et aux modifications attendues du régime des pluies. Son importance déterminera pour une large part l'ampleur du puits de carbone dans le futur.

Le site de Puéchabon héberge aussi des expérimentations d'exclusion de pluie. Dans l'une d'elles, 30% des pluies incidentes sont exclues depuis 2003. Les premiers résultats montrent que les fonctions des populations microbiennes du sol en sont significativement affectées. Il en est de même de la diversité et de l'activité des symbiotes. Dans un autre dispositif, les pluies sont exclues totalement sur de longs laps de temps afin de simuler des sécheresses de fréquence centennale de printemps ou d'été.

**Contacts : Serge Rambal, serge.rambal@cefe.cnrs.fr
Jean-Marc Ourcival, jean-marc.ourcival@cefe.cnrs.fr
Laurent Misson, laurent.misson@cefe.cnrs.fr**

Pour plus d'informations : www.cefe.cnrs.fr/fe/puechabon

Un site expérimental pour quantifier les flux d'eau dans le sol à différentes échelles



Lysimètre et la parcelle dans laquelle il est inclus (Avignon, France)

J-C Gaudu © UMR EMMAH

Le sol est un milieu structuré, composé d'agrégats juxtaposés. Du fait de cette structure, le transfert de l'eau et des solutés dans les sols est loin d'être pleinement compris. En particulier, les modèles prédictifs, qui incluent le transport rapide lié à des chemins préférentiels ou à la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques, ne sont pas encore validés. Depuis 2003, l'UMR EMMAH a mis en place un site expérimental dédié à la quantification des flux d'eau dans le sol (infiltration, drainage lent

et rapide, absorption racinaire, recharge de nappe) à différentes échelles et au test de méthodes géophysiques (tomographie électrique, potentiels spontanés...) adaptées à la zone non saturée du sol. La spécificité du site réside dans l'approche multi-échelles (colonne [dm²], lysimètre [5 m²], parcelle [0,7 ha]) de caractérisation des flux d'eau dans le sol. Ce couplage entre une parcelle grandeur nature, une nappe alluviale de faible profondeur et un lysimètre représentant un modèle réduit de ce site semble unique au sein du dispositif français de recherche.

Ce dispositif semi-contrôlé permet (i) la mise au point de méthodes précédant leur utilisation à grande échelle pour le suivi environnemental, (ii) la caractérisation et la modélisation des processus complexes qui décrivent le transfert de l'eau et des substances associées (en particulier les colloïdes) dans le continuum nappe-sol-plante-atmosphère. La parcelle est équipée d'un système d'irrigation, de piézomètres permettant des prélèvements spatialisés dans la nappe (piézométrie, chimie), de sites de bilans hydriques à relevés manuels (tensiomètres, sonde à neutron) et de bougies de prélèvement. Le lysimètre est équipé de capteurs similaires automatisés, ainsi que de débitmètres pour l'enregistrement des flux de drainage.

Ce site est ouvert à toute équipe qui souhaiterait intervenir, librement ou avec un appui de l'UMR (interventions culturales, appui technique, laboratoires d'analyses), dès lors que ses protocoles sont compatibles avec les contraintes du site.

Contact : François Lafolie, lafolie@avignon.inra.fr

Autres équipes concernées par ce thème

UMR CEFE

Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive

(CNRS, UM1, UM2, UM3, Montpellier SupAgro, Cirad, EPHE)

72 scientifiques

Directeur : Jean-Dominique Lebreton,

direction@cefe.cnrs.fr

www.cefe.cnrs.fr

UPR

Systèmes de semis direct sous couverture végétale (SCV)

(Cirad)

15 scientifiques

Directeur : Francis Forest,

francis.forest@cirad.fr

www.cirad.fr/ur/couvertures_permanents

UPR

Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantation

(Cirad)

15 scientifiques

Directeur : Jean-Pierre Bouillet,

jean-pierre.bouillet@cirad.fr

www.cirad.fr/ur/ecosystemes_plantations

Le laboratoire développe aussi des outils métrologiques en relation avec ses thèmes de recherche comme, par exemple, la caractérisation de la détention d'eau superficielle et le suivi de la composition de l'atmosphère du sol et des échanges gazeux à l'interface sol-atmosphère. Il met aussi en œuvre des techniques de mesures physiques, chimiques, isotopiques et biologiques qui permettent de suivre l'évolution des systèmes étudiés. La présence de physiciens lui permet d'explorer de nouvelles approches théoriques pour la modélisation du transport dans des milieux poreux hétérogènes.

Le laboratoire est impliqué dans des enseignements de niveaux licence et master à l'université d'Avignon et participe aux enseignements dans d'autres universités. Il est

rattaché à l'école doctorale SIBAGHE de Montpellier, fait partie de la fédération de recherche ECCOREV (ÉCosystèmes Continentaux et Risques Environnementaux) et du réseau thématique de recherche avancée « Agronomie, Sud et Méditerranée » de Montpellier.

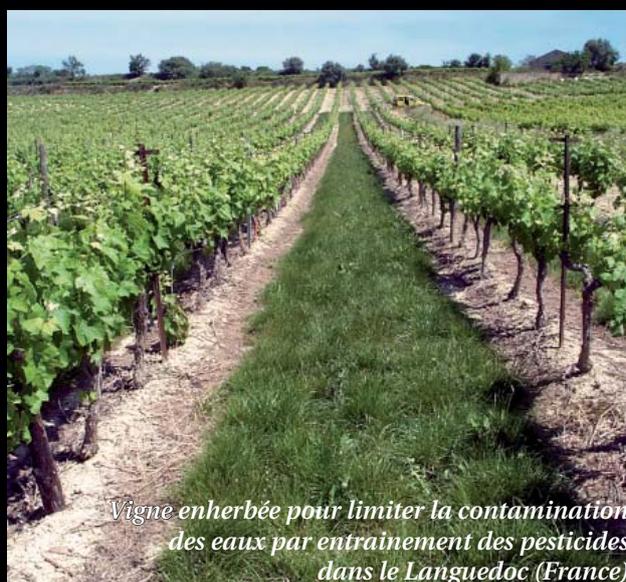
L'UMR est implantée sur le site Inra d'Avignon, mais aussi dans les locaux de l'université et sur le site Agroparc (Avignon). Outre les laboratoires habituels dévolus aux mesures physiques, chimiques, isotopiques et biologiques, elle dispose de deux plateformes expérimentales extérieures. L'une est en liaison avec les techniques de télédétection ; l'autre permet un suivi local (lysimètre) et spatialisé (parcelle) des flux dans la zone non saturée et des relations avec la nappe.

Devenir des matières actives phytosanitaires dans les sols viticoles et les eaux de ruissellement

En zone méditerranéenne, le ruissellement et l'érosion sont importants, ce qui augmente les risques de diffusion des polluants organiques utilisés en agriculture et donc les risques de contamination des sols et des eaux. L'impact des pratiques culturales de la vigne sur les sols et la ressource en eau est d'autant plus important que cette culture est peu couvrante et souvent installée sur des sols peu perméables. La viticulture emploie de nombreux produits herbicides épanchés au printemps dont une fraction est dégradée ou adsorbée sur les particules du sol et l'autre, mobilisable, entraînée par ruissellement lors de pluies. Les processus de dégradation microbiologique des matières organiques sont réduits durant les périodes sèches prolongées.

Ainsi, les concentrations mesurées dans les eaux sont élevées (jusqu'à plusieurs centaines de $\mu\text{g/L}$) et supérieures à la concentration maximale autorisée dans l'eau destinée à la consommation humaine (0,1 $\mu\text{g/L}$, directive n°80/778/CEE). L'eau emprunte des chemins complexes depuis les parcelles jusqu'aux points de prélèvement d'eau potable. Durant ce cheminement, les concentrations initiales diminuent du fait de processus de dégradation, d'adsorption et de dilution. Il s'ensuit que la contamination à la sortie du bassin versant est plus variable et limitée qu'à la sortie des parcelles.

Les études ont permis de proposer des préconisations en termes de pratiques culturales : (i) réduire l'emploi d'herbicides ; (ii) augmenter la capacité d'infiltration des sols par un travail du sol superficiel ou un enherbement dans l'inter-rang ; (iii) limiter l'érosion par le maintien d'un enherbement après les vendanges ; (iv) restaurer l'activité biologique du sol grâce à une couverture herbacée, la restitution au sol des sarments et des feuilles et l'apport d'amendements organiques. Le recours à l'enherbement implique d'évaluer son effet sur la nutrition azotée et l'alimentation hydrique de la vigne.



Vigne enherbée pour limiter la contamination des eaux par entraînement des pesticides dans le Languedoc (France)

La contamination des eaux de surface par entraînement des produits phytosanitaires est un phénomène variable dans le temps et l'espace. Sa maîtrise implique la recherche de pratiques culturales qui diminuent le ruissellement et l'érosion et qui favorisent la dégradation des produits sur le lieu d'épandage. Du fait de la multiplicité des facteurs qui interviennent, une modélisation des phénomènes est nécessaire en sus de l'expérimentation pour définir dans le futur des pratiques agricoles moins polluantes.

Contacts :

Patrick Andrieux, patrick.andrieux@supagro.inra.fr

Marc Voltz, voltz@supagro.inra.fr

Xavier Louchart, louchart@supagro.inra.fr

Réalisation d'analyses physico-chimiques des sols, eaux et végétaux au service de la recherche

Basée à Montpellier et à St Denis de la Réunion, l'unité de service *Analyse des eaux, sols et végétaux* (Cirad) a pour cœur de métier la réalisation d'analyses physico-chimiques de sols, sédiments, supports de cultures, fertilisants, eau et matériel végétal. Trente mille résultats sont obtenus annuellement sur les 2 500 à 3 000 échantillons de sols introduits. Ils concernent des déterminations classiques telles que la granulométrie, le complexe d'échange, le pH, la matière organique, le phosphore assimilable ou les éléments totaux. Ils peuvent provenir d'analyses spécifiques aux sols tropicaux comme la

caractérisation du complexe d'échange au pH du sol, celle des formes particulières de phosphore assimilable, de la solution du sol ou des constituants dits amorphes.

L'US intervient en appui aux unités de recherche du Cirad pour caractériser des sols, évaluer leur fertilité, suivre leur évolution sous culture ou diagnostiquer la présence d'éléments indésirables. Elle répond également aux demandes du même type formulées par d'autres instituts de recherche nationaux (Inra, CNRS, IRD, etc.) ou étrangers (centres nationaux de recherche agronomique...), des ONG, des organismes de développement ou des clients particuliers.

Au-delà du matériel classique de mise en solution (fours à moufle, fours à micro-ondes, centrifugeuses,

etc.), le laboratoire dispose d'équipements performants : spectromètre simultané d'émission plasma, chaînes de colorimétrie à flux continu, analyseurs élémentaires, granulomètre automatique, etc., et depuis peu, un polarographe pour l'analyse et la spéciation des éléments traces métalliques.

La qualité de ses résultats est suivie en permanence par un autocontrôle interne rigoureux et une participation à des enquêtes d'intercomparaison nationale (BIPEA) et internationale (ISE-Wageningen) qui lui valent, depuis 2002, une habilitation délivrée par le ministère de l'Agriculture et de la Pêche pour les analyses physico-chimiques, de granulométrie, d'éléments traces et de reliquats azotés dans les sols. ...

La rhizosphère, lieu des flux de nutriments du sol vers la plante

La rhizosphère est le volume de sol influencé par les racines et le lieu des échanges entre sol, racines, microorganismes et faune associés. Ces échanges, intenses, se traduisent par des flux bi-directionnels d'eau et de nutriments au cœur des cycles biogéochimiques. Environ 40% du carbone fixé lors de la photosynthèse est alloué aux racines. La moitié de ce carbone est libérée dans le sol, ce qui stimule les activités microbiennes. L'architecture du système racinaire et son développement plastique dépendent du carbone alloué et des conditions environnementales rencontrées et définissent le volume de la rhizosphère.

Ce volume varie selon la nature des éléments et des processus biogéochimiques. L'eau et des éléments comme l'azote nitrique (nitrate) sont très mobiles dans le sol : leur absorption par la racine conduit à un déplacement en masse et par diffusion sur plusieurs centimètres. L'ensemble des horizons du sol fortement colonisé par les racines subit leur influence et peut donc être considéré comme rhizosphérique. Les racines d'une même plante et des plantes voisines, de la même espèce ou non, sont alors fréquemment en

compétition pour l'acquisition de cette ressource. À l'inverse, le potassium, et plus encore le phosphore, sont beaucoup moins mobiles dans le sol : leur absorption par la racine induit un gradient de diffusion qui ne concerne que quelques millimètres, voire moins d'un millimètre. Le volume de la rhizosphère peut ainsi ne représenter que 1 à 3% du volume d'un horizon de sol, même dans l'horizon superficiel. À titre d'exemple, chez le palmier à huile en plantation âgé de 5 ans, le modèle d'architecture racinaire AMAPsim a permis d'estimer que le volume de sol utile pour prélever le phosphore et le potassium sur l'ensemble du profil était de respectivement 33 et 235 m³ ha⁻¹. L'estimation et la modélisation des vitesses de croissance des racines et de la dynamique spatiale et temporelle de la rhizosphère qui en résultent sont donc essentielles pour intégrer au niveau du profil de sol, puis de la parcelle, les flux mesurés au niveau de la rhizosphère de segments de racines.

Contacts :

Philippe Hinsinger, philippe.hinsinger@montpellier.inra.fr

Christophe Jourdan, christophe.jourdan@cirad.fr

Le laboratoire est habilité par le service régional de protection des végétaux à importer des sols d'origine non européenne, lui donnant un large éventail d'intervention dans les pays méditerranéens et tropicaux.

Trois activités annexes complètent, alimentent et améliorent son cœur de métier :

■ L'adaptation de méthodes : mise en œuvre d'études ponctuelles pour répondre à des besoins particuliers apparus dans le déroulement normal des activités d'analyse, adaptation aux disponibilités du laboratoire de méthodes existantes et non inscrites à son catalogue, conception de dispositifs d'étude pour répondre à des demandes particulières des clients. Une étude

en cours sur la détermination des fractions granulométriques dans les sols à caractère andique s'inscrit dans ce cadre.

■ Le transfert des connaissances s'adresse à des personnes extérieures au laboratoire, dans le cadre de formations diplômantes ou pratiques sur les méthodes d'analyse, les techniques analytiques ou les principes d'organisation et de gestion d'un laboratoire.

■ L'expertise peut porter sur des sujets de nature et de complexité variées allant du simple conseil sur l'amélioration du fonctionnement d'un laboratoire (ou tout autre domaine entrant dans les compétences du laboratoire) jusqu'à une étude complète destinée à

implanter une unité d'analyse. Ces opérations ciblent des clients internes ou externes au Cirad et se déroulent sur des périodes variables (une journée à plusieurs semaines).

Le système d'organisation de l'ensemble des activités du laboratoire est certifié selon le référentiel ISO 9001 depuis 2000, gage d'une amélioration continue et d'une écoute constante de ses clients pour mieux les satisfaire. ■

▲ *Précipité d'oxydes de fer autour d'une racine d'eucalyptus à plusieurs mètres de profondeur dans un sol sableux en Australie de l'Ouest*



*Dômes des macrocosmes
de l'Ecotron européen de Montpellier, France*

J. Roy © UMR CEFE

L'Ecotron européen de Montpellier pour étudier l'interaction « cycles biogéochimiques - environnement »

Les cycles biogéochimiques sont fortement contraints par les interactions entre les ressources du milieu, la diversité et l'activité des organismes vivants et les conditions environnementales. Ces interactions, nombreuses, sont aussi dynamiques : les organismes vivants répondent à une variation d'environnement d'une façon plastique à court terme, structurelle puis démographique à moyen terme et évolutive à long terme. La prédiction du devenir des cycles biogéochimiques et de leurs conséquences (p. ex. l'impact du gaz carbonique et du méthane sur le climat) doit prendre en compte cette complexité.

L'Ecotron est un maillon important entre l'analyse de fonctions élémentaires en conditions simplifiées et l'étude d'écosystèmes in situ. En confinant des écosystèmes dans des enceintes, il permet d'une part la simulation d'une large gamme de conditions environnementales (température, conditions hydriques, CO₂, polluants) en croisant les niveaux de plusieurs facteurs, et, d'autre part, la mesure précise des principaux flux générés par l'écosystème et l'établissement de bilans. Des capacités de mesure importantes le caractérisent, notamment les mesures en ligne de photosynthèse, respiration, transpiration, dégagement de méthane et d'oxyde nitreux et des rapports isotopiques ¹³C/¹²C et ¹⁸O/¹⁶O du CO₂. L'approche isotopique comprend aussi un marquage ¹³C de la matière organique nouvellement formée.

Ces mesures sont complétées ponctuellement par des mesures non invasives (réflectance spectrale...) ou sur des prélèvements de sol ou de plante. Implanté sur le campus de Baillarguet (France), l'Ecotron est constitué de trois plateaux expérimentaux. Les macrocosmes (12 unités de 35 m³) peuvent accueillir des échantillons d'écosystèmes de 1 à 8 tonnes. Les mésocosmes (24 unités de 2 à 3 m³) peuvent accueillir des échantillons d'écosystèmes de 0,2 à 1 tonne, et en particulier les lysimètres standards actuellement en service en Europe. Le plateau microcosmes en laboratoire L2 accueillera dans des volumes de 1 à 200 dm³ des microécosystèmes de natures diverses.

L'Ecotron est ouvert à la communauté scientifique internationale. Son comité scientifique européen sélectionnera les projets de consortiums d'équipes qui valoriseront au mieux la plateforme. Que les projets soient orientés vers la physiologie de l'écosystème ou la biologie des populations ou des communautés, le rôle et la réponse de la biologie du sol seront au cœur de beaucoup d'entre eux.

Contact : Jacques Roy, jacques.roy@cefe.cnrs.fr

Pour plus d'informations : www.ecotron.fr



E. Blanchard © UMR Eco&Sols

Les vers anéciques, animaux emblématiques des sols

Les sols sont des milieux
vivants dont les organismes
assurent de nombreuses
fonctions

Le sol revêt une importance fondamentale et évidente pour l'humanité en tant que support des plantes, substrat physique de la plupart des activités humaines et en raison de ses fonctions environnementales. Dans les systèmes naturels et cultivés, le sol est au cœur des régulations de la majorité des services écosystémiques nécessaires au bien-être des humains. Le sol est donc essentiel au fonctionnement des écosystèmes terrestres et il constitue une ressource naturelle d'importance majeure pour la gestion durable des écosystèmes.

Le sol supporte une large proportion de la biodiversité terrestre. On estime qu'un quart des espèces actuellement décrites vivent dans le sol. Pourtant, la connaissance de la biodiversité du sol reste très incomplète et le développement récent des techniques moléculaires a confirmé l'extraordinaire biodiversité présente dans les sols. Cette biodiversité, depuis les microorganismes jusqu'à certains mammifères, est largement due à l'hétérogénéité physique et chimique du sol qui permet le développement et le maintien d'un très grand nombre de niches écologiques. Cette diversité biologique est associée à une importante diversité fonctionnelle et à une grande complexité des interactions écologiques. Le fonctionnement du sol et sa contribution aux services écosystémiques essentiels au fonctionnement durable des écosystèmes reposent en grande partie sur les rôles fonctionnels joués par les organismes du sol dans les processus écologiques. Par exemple, de nombreux processus des cycles biogéochimiques se déroulent dans le sol et sont réalisés par des organismes du sol très variés (bactéries, champignons, protozoaires, racines, faune).

Les organismes du sol affectent aussi la productivité végétale, que ce soit de manière directe ou indirecte (modifications des cycles du carbone et des nutriments, de la structure du sol, interactions trophiques et contrôle des parasites et pathogènes). La distribution dans le temps et dans l'espace des processus biologiques n'est ni aléatoire, ni homogène : les recherches ont montré que les activités des organismes du sol sont concentrées dans des « hot spots » d'activité généralement associés à la disponibilité en substrats carbonés. C'est ainsi que les habitats microbiens sont associés aux fractions organiques, aux agrégats (agrégatosphère), à la litière en décomposition (détritosphère), au sol influencé par les vers de terre (drilosphère), à certains types de porosité (porosphère) et au contact étroit des racines (rhizosphère).

Pourtant, le rôle des organismes dans ces processus biophysiques et biogéochimiques reste encore mal compris. Existe-t-il par exemple une relation causale entre diversité biologique et fonctionnement de l'écosystème ? Combien d'espèces sont nécessaires pour assurer chaque fonction écosystémique ? Les réponses à ces questions sont complexes car beaucoup d'espèces exercent la même fonction (redondance fonctionnelle), certaines espèces assurent différentes fonctions (multifonctionnalité), enfin d'autres espèces contribuent relativement peu aux propriétés de l'écosystème. Les recherches récentes ont permis d'identifier des groupes fonctionnels, responsables de processus écosystémiques essentiels : micro-symbiotes (fixateurs d'azote, mycorhizes), décomposeurs (de la lignine ou de la cellulose), transformateurs d'éléments (nitrifiants et dénitrifiants), ingénieurs du sol (vers de terre, termites), pathogènes (vers blancs, nématodes phytoparasites), micro-régulateurs (prédateurs, parasites), rhizobactéries promotrices de croissance. La métagénomique (étude de l'ensemble des génomes microbiens) permet d'appréhender le fonctionnement global des sols et d'identifier les groupes microbiens responsables des processus en utilisant des approches de génomique comparative.

Les questions sociétales actuelles (altération de la biodiversité et des services écosystémiques, durabilité des écosystèmes face à la nécessité de fournir des aliments et des fibres à une population croissante et face aux changements globaux) rendent la recherche en écologie du sol plus nécessaire que jamais. La connaissance des organismes du sol et de leurs fonctions est une des clés de la gestion durable des écosystèmes terrestres. Le développement de systèmes de production durables doit être fondé sur une utilisation efficace des ressources du sol et donc des organismes dont les fonctions représentent un potentiel encore très mal exploité. L'ingénierie écologique semble ainsi particulièrement prometteuse, notamment en visant des organismes ayant des capacités vis-à-vis du recyclage des nutriments, de la modification de la structure du sol, et du contrôle biologique.

Les recherches menées par les équipes d'Agropolis International participent à la compréhension du fonctionnement biologique des sols.

**Éric Blanchart (UMR Eco&Sols)
et Isabelle Navarro (UMR LSTM)**

Les sols des milieux *dont les organismes* assurent de nombreuses *fonctions*

Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols : ingénierie écologique au service du développement durable

Le sol est le support principal de la production primaire des écosystèmes terrestres. Le maintien de cette fonction de production végétale a longtemps reposé, dans les écosystèmes anthropisés, sur la gestion des intrants (minéraux, organiques) et des propriétés physiques et chimiques des sols. Cette stratégie a permis un doublement de la production alimentaire mondiale entre 1960 et 1995, mais elle s'est accompagnée, au cours de la même période, d'une multiplication par près de sept des apports d'intrants fertilisants azotés et par plus de trois de ceux d'engrais phosphatés.

Compte tenu des impacts environnementaux de telles pratiques, cette stratégie ne peut constituer une réponse durable à la nécessaire augmentation de la production végétale pour faire face à l'accroissement démographique des décennies à venir. Par ailleurs, les sols et leurs services pour la société ne se résument pas uniquement à la fonction de production. Maintenir le patrimoine sol nécessite la prise en compte de l'ensemble des services que les sols rendent aux sociétés (régulation du climat, purification de l'eau, ...).

Dans le contexte d'une nécessaire augmentation de la productivité primaire, d'une maîtrise des intrants (chimiques et organiques) et des changements globaux (changement climatique et d'usage des terres), les objectifs scientifiques de l'UMR *Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols* (Eco&Sols, IRD, Inra, Montpellier SupAgro) sont de comprendre, décrire et prévoir les processus biologiques impliqués dans les services écosystémiques de régulation des flux d'éléments dans le système sol-plante, particulièrement du carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P). Les travaux réalisés dans cette UMR concernent les régulations biologiques de (i) la biodisponibilité et l'acquisition par les plantes des nutriments (N et P), (ii) la séquestration du carbone et l'émission de gaz à effet de serre et (iii) la biodisponibilité et l'écodynamique des contaminants biologiques (virus, protéines Bt...).

Pour atteindre ces objectifs, les travaux de l'UMR Eco&Sols s'attachent à préciser l'impact des organismes qui vivent dans les sols (racines des plantes, vers de terre, termites, nématodes, champignons, bactéries) sur les flux qui traversent les différents compartiments du système sol-plante, en mettant l'accent sur des relations telles que la prédation, la compétition, la facilitation, la symbiose, la rhizodéposition et la bioturbation par la macrofaune. ...

Les principales équipes

UMR CEFE

Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive

(CNRS, UMI, UM2, UM3, Montpellier SupAgro,
Cirad, EPHE)

72 scientifiques

Directeur : Jean-Dominique Lebreton,

direction@cefe.cnrs.fr

www.cefe.cnrs.fr

UMR Eco&Sols

Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols

(IRD, Inra, Montpellier SupAgro)

45 scientifiques

Directeur : Jean-Luc Chotte,

jean-luc.chotte@ird.fr

UMR LSTM

Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes

(Cirad, Montpellier SupAgro, UM2, IRD, USC Inra)

42 scientifiques

Directeur : Bernard Dreyfus,

dreyfus@mpl.ird.fr

www.mpl.ird.fr/lstm

... suite page 34



*Partie antérieure d'un nématode
bactérivore Cephalobus sp.
(microscopie électronique à balayage)*

Régulations trophiques et non trophiques des activités microbiennes dans les sols

Le sol est un milieu vivant dans lequel les organismes assurent et régulent la plupart des fonctions. Les microorganismes jouent un rôle majeur dans le recyclage des nutriments (fixation d'azote, minéralisation de la matière organique, libération de nutriments pour les plantes...) et la dégradation des polluants. La diversité et l'activité de ces microorganismes sont régulées par des composantes abiotiques (pH, teneur en eau...) et biotiques. Parmi ces composantes biotiques, les nématodes sont connus pour réguler, de façon directe, les communautés microbiennes. En effet, une grande diversité de nématodes consomment des bactéries (nématodes bactérivores) ou des champignons (nématodes fongivores), ou les deux indifféremment (nématodes omnivores). Par ailleurs, la communauté des nématodes du sol (ce qui inclut des nématodes phytoparasites et des nématodes prédateurs) a une influence indirecte sur les micro-organismes en modifiant les ressources disponibles pour ceux-ci.

L'étude de la structure de la communauté des nématodes en groupes trophiques permet de comprendre le bio-fonctionnement du sol en caractérisant de façon indirecte le compartiment microbien. D'autres organismes comme les vers de terre ou les termites, appelés « ingénieurs du sol », régulent de façon non trophique les microorganismes en modifiant l'environnement physique et la disponibilité en ressources pour ces microorganismes. Par exemple, les vers de terre ou les termites, en modifiant l'agrégation du sol, définissent les habitats microbiens (zones du sol où les activités microbiennes sont soit stimulées, soit atténuées). Ainsi, les turricules (déjections) récents de vers de terre sont le siège d'une importante minéralisation de la matière organique (libération d'azote minéral utilisable par les plantes) alors que les turricules anciens se caractérisent par une minéralisation limitée permettant ainsi le stockage du carbone dans les sols. Des travaux menés actuellement à Madagascar montrent que les vers de terre affectent les communautés microbiennes liées aux cycles du carbone et de l'azote.

**Contacts : Cécile Villenave, cecile.villenave@ird.fr
Éric Blanchart, eric.blanchart@ird.fr**

5 μm

Activité microbienne et cycle de l'azote dans les sols

Les sols sont des milieux pauvres en azote (de 0,3 à 3% du poids sec) alors que cet élément constitue de 5 à 50% du poids sec des plantes. Le cycle de l'azote a pour particularité de dépendre étroitement de l'activité bactérienne des sols. Certaines espèces végétales, les fabacées, sont associées à des bactéries symbiotiques, les « rhizobia », qui sont capables de fixer l'azote moléculaire atmosphérique (N_2). Les autres espèces végétales dépendent de la fourniture d'azote minéral par les bactéries, soit sous forme d'ammonium (NH_4^+) par les bactéries ammonifiantes, soit sous forme de nitrate (NO_3^-) par les bactéries nitrifiantes. L'agriculture a jusqu'à présent privilégié l'apport direct à la plante d'azote minéral sous forme de fertilisants. Cette stratégie pose de sérieux problèmes environnementaux, dont la lixiviation du nitrate vers les nappes phréatiques et l'émission d'oxyde nitreux (N_2O), gaz qui contribue de manière importante à l'effet de serre. Relevons que cette émission d'oxyde nitreux dépend elle-même de l'activité des communautés de bactéries dénitrifiantes.

Une agriculture à bas intrants, plus respectueuse de l'environnement, doit mieux appréhender ce compartiment bactérien. Elle doit donc chercher à stimuler sélectivement les communautés bactériennes qui minéralisent l'azote organique pour la plante, tout en réduisant l'activité des communautés bactériennes responsables de l'émission d'oxyde nitreux. Cet enjeu est particulièrement important pour les pays tropicaux où les fertilisants sont chers et peu accessibles.



J.-J. Drevon © UMR Eco&Sols

Nodules de rhizobium sur des racines de haricot

Une des stratégies de l'agriculture à bas niveau d'intrants ou « conservative » est de restituer aux sols les résidus agricoles. Cependant, si elle permet d'augmenter le stock de matière organique, elle peut aussi avoir comme effet collatéral d'augmenter les émissions de N_2O . L'UMR Eco&Sols a fortement investi sur cette thématique et elle a montré à Madagascar que le système de semis direct sous couverture

végétale permanente (SCV), n'augmentait pas les émissions de N_2O . Ces résultats suggèrent que l'émission de N_2O dépend pour une large part de la qualité des litières organiques (rapport C/N, rapport lignine/phénol).

**Contacts : Alain Brauman, alain.brauman@ird.fr
Lydie Lardy, lydie.lardy@ird.fr**

Cette démarche écosystémique centrée sur les communautés fonctionnelles et les réseaux d'interactions est au centre des approches expérimentales de laboratoire (en microcosmes et mésocosmes) et de terrain dont les objectifs finalisés sont le développement d'une ingénierie écologique conciliant objectifs de production agronomique durable et maintien des services environnementaux des sols. La stabilité et la résilience de ces communautés fonctionnelles au changement climatique et au changement d'usage des terres sont étudiées dans des contextes pédoclimatiques contrastés, méditerranéens et tropicaux, dans le cadre de collaborations avec des centres nationaux de recherche agronomique et des universités du Sud.

Ces démarches expérimentales sont fortement associées à une démarche de modélisation à la fois dédiée à la formalisation des processus biologiques déterminant le fonctionnement des sols et à la prédiction des flux dans le système « sol-plante ».

Microbiologie et biologie des plantes : biodiversité, microorganismes symbiotiques, réponse et adaptation des plantes

Le *Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes* (LSTM, Cirad, Inra, IRD, Montpellier SupAgro, UM2) est une unité de microbiologie et de biologie des plantes, spécialisée dans la biodiversité, les mécanismes de fonctionnement des microorganismes symbiotiques et dans la réponse et l'adaptation des plantes à ces microorganismes et aux conditions extrêmes de l'environnement. Les recherches menées par le laboratoire vont de la caractérisation et l'analyse de la biodiversité des microorganismes symbiotiques à la compréhension des mécanismes moléculaires impliqués dans l'interaction plantes/bactéries.

Ses études et champs d'application s'intéressent aux milieux méditerranéens et tropicaux où les symbioses microorganismes/plantes permettent d'améliorer durablement

Autres équipes concernées par ce thème

UMR SYSTEM

Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens

(Cirad, Inra, Montpellier SupAgro)

22 scientifiques

Directeur : Jacques Wery,
wery@supagro.inra.fr
<http://umr-system.cirad.fr>

UMR EMMAH

Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

(Inra, UAPV)

37 scientifiques

Directrice : Liliana Di Pietro,
dipietro@avignon.inra.fr

www.avignon.inra.fr/les_recherches_/liste_des_unites/emmah_environnement_mediterraneen_et_modelisation_des_agro_hydrosystemes

Rôle des interactions bactéries/nématodes bactérovores sur la nutrition minérale du pin maritime

Les relations entre les microorganismes et leurs prédateurs déterminent les vitesses des cycles des éléments nutritifs et elles influent considérablement sur la disponibilité en éléments minéraux pour la plante. L'effet bénéfique de ces relations sur la croissance des racines et la nutrition minérale a été clairement démontré chez les plantes annuelles. Cependant, contrairement aux plantes herbacées, on dispose de peu de données expérimentales à propos du rôle joué par ces interactions sur le développement racinaire et la nutrition minérale des plantes ligneuses. Dans les écosystèmes forestiers des régions tempérées, les racines des arbres vivent systématiquement en association avec des champignons symbiotiques du sol qui forment des organes mixtes appelés ectomycorhizes.

Ces ectomycorhizes hébergent à leur tour des populations bactériennes spécifiques (les BAMS, pour Bactéries Associées aux Mycorhizes) qui peuvent être isolées et cultivées au laboratoire. L'UMR Eco&Sols a initié une nouvelle thématique de recherche sur ces réseaux trophiques en posant comme hypothèse de travail que des interactions bactéries/nématodes bactérovores existent au voisinage des plantes ligneuses, en particulier entre les nématodes et les BAMS. Une première expérimentation a été mise en place en 2008 pour tester différents traitements de co-inoculation entre une espèce de nématode, une souche de bactérie de type *Pseudomonas fluorescens*, un champignon ectomycorhizien modèle *Hebeloma cylindrosporum* et une espèce ligneuse importante économiquement en France, le pin maritime (*Pinus pinaster*). Le nématode, la souche bactérienne

les productions agricoles et forestières et de restaurer les environnements menacés. Le LSTM s'intéresse aux champs scientifiques suivants :

- caractériser la biodiversité des symbioses dans les écosystèmes méditerranéens et tropicaux ;
- comprendre la structuration et l'évolution de la diversité génétique des populations bactériennes symbiotiques (approches phylogénétique et de génétique des populations) ;
- étudier la diversité génomique des *Bradyrhizobium* photosynthétiques ainsi que les mécanismes d'interaction bactéries/plantes hôtes et de régulation induits par la lumière ;
- caractériser une nouvelle voie de signalisation possible entre un rhizobium et une fabacée, suggérée par l'absence de gènes de nodulation communs chez les *Bradyrhizobium* photosynthétiques ;
- décrypter les voies de signalisation des plantes en réponse aux bactéries. Outre l'identification de ces voies, l'objectif est de comprendre leurs interactions et de caractériser les gènes bactériens impliqués dans leur induction ;

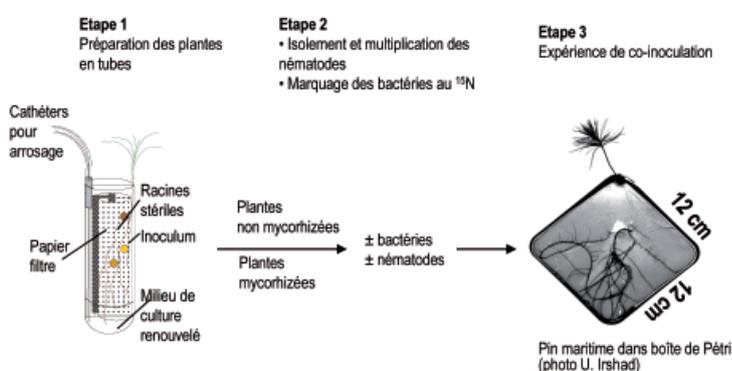
- étudier l'adaptation des microorganismes symbiotiques aux contraintes prévalant dans les sols méditerranéens et sahéliens, notamment le stress hydrique et les températures élevées, en fonction des changements climatiques et des activités anthropiques (agricoles et minières). Ces études permettront, notamment par des approches de métagénomique, de comparer la diversité des micro-organismes dans des zones agro-écologiques variées et de caractériser les mécanismes physiologiques et génétiques impliqués dans l'adaptation aux stress chez des souches bactériennes isolées de ces sols afin de participer à une optimisation du fonctionnement des symbioses dans ces conditions environnementales ;
- étudier les mécanismes de l'adaptation des plantes et microorganismes associés aux contraintes édaphiques extrêmes des sols ultramaïques de Nouvelle-Calédonie. Les niveaux d'approche de génomique fonctionnelle permettront de caractériser les mécanismes de (i) la résistance et de l'hyperaccumulation des métaux chez les plantes, (ii) l'adaptation des micro-organismes associés

- aux plantes et (iii) les interactions plantes-microorganismes ;
- transférer et valoriser une technologie de développement durable pour les pays du Sud afin de proposer des méthodologies susceptibles d'intéresser le développement durable et les entreprises du domaine des biotechnologies.

Cinq équipes composent le LSTM :

- Écologie et physiologie moléculaire des *Bradyrhizobium* photosynthétiques ;
- Biodiversité et évolution des symbioses ;
- Réponse des plantes aux microorganismes ;
- Adaptation des plantes et des microorganismes au nickel ;
- Fonctionnement symbiotique des écosystèmes.

Outre les partenariats développés localement (pôle montpellierain), le LSTM collabore avec les laboratoires français les plus compétents dans ce domaine. Dans le cadre du Centre National de Recherche Technologique « Nickel et son Environnement » de Nouvelle-Calédonie, l'UMR participe ●●●



Plan d'expérience pour étudier l'effet des réseaux trophiques (champignons ectomycorhiziens, bactéries associées et nématodes bactériophages) sur la croissance racinaire et la nutrition minérale du Pin maritime.

et le partenaire fongique ont tous été isolés à partir de sol et d'ectomycorhizes prélevés dans la forêt des Landes de Gascogne (France). Le principe de l'expérience repose sur un marquage au ¹⁵N des bactéries. Les premiers résultats suggèrent que la prédation des bactéries par les nématodes libère de l'azote et du phosphore. Ce dernier élément est indispensable pour absorber le nitrate apporté au milieu de culture.

**Contacts : Claude Plassard, plassard@supagro.inra.fr
Cécile Villenave, cecile.villenave@mpl.ird.fr
Alain Brauman, alain.brauman@ird.fr**

à la mise en place d'une plateforme commune de biologie moléculaire à Nouméa, en liaison étroite avec l'Université de la Nouvelle-Calédonie et l'Institut Agronomique néo-Calédonien. Les liens pour le développement seront poursuivis avec les pays d'Afrique de l'Ouest (via le laboratoire commun IRD/ISRA/UCAD de Dakar) et du pourtour méditerranéen. L'UMR souhaite jouer un rôle moteur dans la constitution de deux réseaux de laboratoires - méditerranéen et sub-saharien - en microbiologie et restauration de l'environnement.

Les collaborations concernant la génomique avec des laboratoires américains seront renforcées en liaison avec le Génoscope d'Évry et l'UCLA-DOE *Institute for Genomics and Proteomics* à Los Angeles.

Le LSTM dispense de nombreux enseignements et participe à l'organisation de formations universitaires de biologie et physiologie. Il soutient les formations au travers d'interventions et d'encadrement de stages professionnels ou de recherche.

Étude des cycles d'énergie, de l'eau, des éléments nutritifs et décomposition de la matière organique

Le *Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive* (CEFE, CNRS, UM1, UM2, UM3, Montpellier SupAgro, Cirad, EPHE) développe un large champ de recherches sur la dynamique de la biodiversité dans les milieux terrestres. Ses objectifs sont, entre autres :

- d'évaluer les flux de matière et d'énergie échangés entre les écosystèmes et leur environnement et au sein des écosystèmes ;
- de prédire leurs réponses aux

changements globaux et, plus particulièrement, de prendre en compte l'action de l'homme dans ces changements ;

- d'évaluer le rôle de la diversité des organismes dans la régulation de ces flux.

Pour répondre à ces objectifs, le CEFE étudie les mécanismes impliqués dans plusieurs fonctions clés des écosystèmes terrestres : cycles de l'énergie, de l'eau, du carbone, du phosphore et de l'azote ainsi que la décomposition de la matière organique. Dans le cadre de ces recherches, le sol constitue un compartiment essentiel du fonctionnement des écosystèmes.

En effet :

- Le sol est un réservoir d'eau qui régule l'imprévisibilité de cette ressource pour les végétaux mais qui assure aussi un environnement favorable aux micro-organismes et à la macrofaune ;
- Le sol constitue un réservoir d'éléments minéraux et un récepteur de déchets organiques mis à la disposition des organismes qui l'habitent ;
- Le sol héberge une diversité d'organismes (microorganismes, macrofaune) qui assurent des fonctions essentielles telles que les transformations biogéochimiques du carbone, de l'azote, du phosphore, etc. ;
- Le sol est le siège de jeux complexes d'interactions inter- et intra spécifiques entre les organismes qu'il héberge et la contrepartie photo-réceptrice de l'écosystème.

Les approches développées au CEFE se situent à plusieurs niveaux hiérarchiques afin d'appréhender toute la complexité du fonctionnement des écosystèmes :

- Des approches locales in situ permettent de caractériser la diversité biologique et la variabilité

du fonctionnement du sol et de l'expliquer (étude de la variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques du sol et de son fonctionnement biologique, étude des relations entre diversité végétale et microbienne, conséquences des perturbations anthropiques sur ce fonctionnement, etc.) ;

- Des approches sur terrains expérimentaux ou en conditions contrôlées (microcosmes) permettent de mesurer ces flux et de mettre en évidence les déterminants environnementaux de leur contrôle, par exemple (i) en manipulant la diversité à différents niveaux trophiques (diversité végétale, animale ou microbienne) dans les systèmes étudiés ou encore (ii) en modifiant les conditions du milieu (exclusion de pluie, qualité de la matière organique, ...) ou (iii) par des suivis à long terme permettant d'évaluer la vulnérabilité de certaines fonctions à des événements extrêmes ;
- Des approches de modélisation (modélisation des flux d'énergie, d'eau et de matière et de la respiration de l'écosystème).

Les multiples moyens analytiques dédiés à ces thématiques incluent des techniques d'analyse de composés volatiles (gaz à effet de serre, composés organiques volatiles), de mesures in vitro d'activités enzymatiques du sol et de ses communautés fongiques et bactériennes, de caractérisation de la matière organique du sol ou des litières ou encore d'outils de typage moléculaire pour explorer la diversité taxonomique des organismes du sol.

Enfin, les modèles biologiques pour développer ces recherches sont les écosystèmes méditerranéens (friches méditerranéennes, forêts de chênes verts) et tropicaux (forêt tropicale humide, etc.). ■

Biodiversité des microorganismes dans la rhizosphère

D. Housaini © LSTM



Jeune pin maritime inoculé par le champignon symbiotique ectomycorhizien Hebeloma cylindrosporum

Dans le sol, des microorganismes s'associent aux plantes pour former des symbioses. Ainsi, des champignons du sol forment des mycorhizes sur les racines de plus de 90% des espèces végétales. C'est aussi le cas des rhizobiums, bactéries qui forment des nodosités sur les racines des fabacées.

Ces organes symbiotiques jouent un rôle important dans la nutrition azotée et phosphatée des plantes. Les champignons mycorhiziens augmentent le volume de sol exploré par le système racinaire et mobilisent des substances minérales ou organiques inaccessibles aux plantes. Les nodosités des fabacées réduisent l'azote atmosphérique en formes assimilables par les plantes, ce qui permet leur croissance dans des écosystèmes naturels peu fertiles ou dans les agrosystèmes sans apport de fertilisant azoté.

D'une manière générale, les symbioses jouent un rôle primordial dans les processus écologiques. Dans les successions végétales, les fabacées enrichissent le sol en azote du fait de la fixation symbiotique par leurs nodosités. Parallèlement, la mycorhization explique comment certaines espèces végétales sont remplacées par d'autres. Des travaux récents ont montré que les champignons symbiotiques peuvent alimenter en carbone des plantes de sous-bois, ce qui compense la diminution de photosynthèse due à l'ombrage des arbres. Ce processus aurait contribué à l'évolution de plantes devenues non-chlorophylliennes.

D'un point de vue pratique, il est possible d'isoler et d'inoculer spécifiquement ces microorganismes pour améliorer la croissance des plantes, par exemple le rendement et la qualité protéique des graines de fabacées, ou contrôler la production de champignons comestibles, comme les truffes, le lactaire délicieux ou les cèpes. Toutefois, l'efficacité de la symbiose varie considérablement selon le partenaire microbien. Les recherches en cours visent principalement à caractériser la diversité génétique de ces microorganismes symbiotiques (des dizaines d'espèces sont impliquées), à étudier la signification fonctionnelle de cette diversité, à comprendre le fonctionnement des organes symbiotiques et à décrypter les signaux moléculaires du dialogue entre les végétaux et les microbes.

**Contacts : Marc-André Selosse, ma.selosse@wanadoo.fr
Gisèle Laguerre, gisele.laguerre@supagro.inra.fr**



© UFRAL

*Fouille d'un îlot de maisons à cour (fin du I^{er} s. av. J.-C.)
de la ville portuaire de Lattara, Hérault, France.*

Les sols enregistrent *l'histoire des hommes* et des écosystèmes

L'étude des environnements passés s'appuie largement sur des indicateurs géochimiques et biologiques contenus dans les glaces, les sédiments des lacs et les sols. Ces indicateurs consistent en éléments minéraux, comme l'azote ou le phosphore, en isotopes ou en terres rares dont les concentrations varient selon les climats, les couverts végétaux ou l'exploitation du milieu par l'homme. Ils consistent aussi en une grande variété de restes biologiques, débris végétaux (graine, aiguille, bourgeon...), grains de pollen, phytolithes (cristaux de silice produits par les végétaux), algues à enveloppe siliceuse (diatomées), et restes animaux (insectes, crustacés, acariens). Leur analyse renseigne sur la composition des environnements passés et permet d'explorer les conséquences des changements climatiques ou anthropiques sur le fonctionnement et la biodiversité des écosystèmes naturels ou cultivés.

Les sols sont de première importance pour l'étude des populations et sociétés humaines passées. De fait, nous sommes entourés de sols archéologiques qui ont été produits par des millénaires de présence humaine occupant momentanément ou durablement un lieu pour l'habiter, pour s'y installer ou pour y pratiquer l'agriculture. Les sols recèlent les premières traces ténues d'habitats ou de structure de combustion du Paléolithique, les premières formes d'habitat apparues au cours du Néolithique et celles des premiers villages et des premières agglomérations. Les déchets domestiques de toute nature, vaisselle, outillage de pierre ou de métal, petits objets de la vie quotidienne, restes de consommation animale et végétale, le plus souvent carbonisés, les charbons de bois et les ossements sont conservés dans les sols d'habitats (maisons et voies de circulation). Ils nous renseignent sur les habitudes de consommation, les modes de vie, l'économie vivrière, et le commerce de ces sociétés. Les nécropoles, à incinération ou à inhumation, sont également riches de renseignements sur les paléopathologies humaines, les rites funéraires pratiqués, les formes d'organisation et de hiérarchisation de ces sociétés.

Le sol est une archive que paléo-écologues et archéologues savent lire pour en déceler son histoire, et celle des couverts végétaux et des sociétés humaines qu'il a portés. Ces disciplines s'appuient aujourd'hui sur un large spectre de compétences, comme la sédimentologie, la paléobotanique (palynologie, anthracologie et carpologie), l'archéo-zoologie (faune terrestre et ichtyofaune), la géo-archéologie et l'anthropologie physique.

Depuis qu'elles existent, la paléo-écologie et l'archéologie ont cherché des marqueurs qui permettent d'établir une chronologie de plus en plus précise de l'évolution des écosystèmes et des sociétés humaines. Ces disciplines s'appuient désormais sur une palette de technologies modernes de datation.

Ces recherches ont pour enjeux de comprendre l'évolution des sociétés humaines et des changements qu'ont subis les écosystèmes du fait de processus naturels ou suite à leur occupation par l'homme. En effet, les changements climatiques et les refuges biologiques depuis la dernière déglaciation, qui date de 18 000 ans, conditionnent l'histoire et l'organisation des systèmes écologiques. Des contraintes de nature de sol, de relief, de voie migratoire, de régime de perturbations naturelles (incendies, épidémies d'insectes, avalanches, tempêtes, ...) ont contribué à organiser et à structurer les systèmes écologiques actuels. Des populations humaines s'y sont implantées et développées. L'étude des archives archéologiques contenues dans les sols permet de comprendre les raisons de ces occupations, la typologie des occupants, la structure démographique des populations et leurs pathologies, les modes de vie et les innovations agraires, la relation de ces populations à leur environnement comme source de matériaux d'habitat ou d'outils, de nourriture ou de sources énergétiques. Enfin, l'occupation humaine des territoires a modifié l'organisation naturelle des systèmes écologiques en raison de l'exploitation des ressources du milieu, du développement de pratiques sylvo-agro-pastorales, et de la perturbation du jeu des contraintes. L'étude des mécanismes, de la cinétique et de la chronologie de l'anthropisation des systèmes naturels permet de comprendre leur réactivité et est utile pour mieux appréhender la gestion durable des ressources et des territoires.

La compréhension historique des interactions entre les sociétés humaines et les milieux est un enjeu environnemental, social et politique majeur et d'actualité pour établir une compatibilité durable entre la dynamique des systèmes sociaux et celle des composantes naturelles de leur environnement. L'exploration de ces archives permet de construire des scénarios sur des durées qui excèdent largement le siècle, quelquefois le millénaire. L'archéologie et la paléo-écologie contribuent ainsi à répondre aux questions fondamentales : d'où venons-nous, qui sommes-nous et quel peut être notre devenir ?

Christopher Carcaillet (UMR CBAE, CNRS/EPHE/UM2), Philippe Blanchemanche (UMR ASAP, CNRS/Culture/UM3/Inrap)

Les sols enregistrent *l'histoire des hommes* et des écosystèmes

Changement des environnements anciens et pratiques humaines

Les activités du *Centre de Bio-Archéologie et d'Écologie* (UMR CBAE, CNRS, EPHE, UM2, Inrap) visent (i) à comprendre comment les environnements anciens ont changé au cours des derniers siècles ou millénaires et (ii) à déterminer les liens qui unissent les pratiques humaines aux changements environnementaux touchant le fonctionnement des écosystèmes, l'organisation des communautés et l'ordonnement géographique des populations. Les changements environnementaux passés résultent de modifications d'usage du sol (agriculture, exploitation des ressources) mais aussi de modifications climatiques ou orographiques. Les recherches menées par le CBAE concernent les régions du pourtour méditerranéen, y compris le Moyen-Orient, les régions tropicales (Afrique, Amérique du Sud) et les régions boréales (Canada, Scandinavie).

Pour analyser ces processus, le CBAE met en œuvre des stratégies et des méthodes reposant sur l'exploitation d'indicateurs biologiques et géochimiques contenus dans les sols naturels et archéologiques, ainsi que dans des dépôts de surface comme les tourbières, les tufs ou travertins, et les sédiments de lacs. Ces formations superficielles qui recouvrent le sous-sol se sont accumulées au cours des derniers millénaires dans la plupart des cas, parfois pendant tout le Pléistocène*. Ces dépôts (ou archives) sont influencés par les modifications du couvert végétal, par les activités de la pédofaune, par les modifications des

flux géochimiques dans les bassins versants et par les changements des pratiques d'occupation du sol par les populations humaines.

Les chercheurs du laboratoire s'intéressent également aux modalités d'exploitation et d'usage des ressources biologiques naturelle, de la cueillette de matériaux à leur transformation en vue d'une exploitation domestique. Cet objectif est en plein essor et vise à analyser la naissance de l'agriculture préhistorique et des voies de domestication (cinétique, mécanisme). En effet, les sols archéologiques recèlent une grande quantité de restes végétaux de différentes natures, origines et utilités. Ces restes sont le produit de récolte et de transformation d'organes de végétaux en vue d'usages domestiques (ressources vivrières, matériaux de chauffage ou de construction, etc.). Les restes végétaux des sols archéologiques permettent de retracer l'histoire de l'alimentation des sociétés, des pratiques ethnobotaniques et agronomiques depuis la récolte des végétaux jusqu'à leur transformation, et, dans certains cas, d'analyser des pratiques culturelles liées aux crémations des corps ou des enfouissements funéraires.

Les thèmes de recherche prioritaires de l'UMR sont :

- la domestication et la paléoaquiculture ;
- le rôle des incendies sur la dynamique des écosystèmes terrestres ;
- le rôle de la déprise agropastorale sur la structuration des paysages forestiers actuels. ...

* Nom moderne du Quaternaire, la plus récente des périodes géologiques, dont la durée est d'environ 1,8 million d'années.

Les principales équipes

UMR CBAE

Centre de Bio-Archéologie et d'Écologie

(CNRS, EPHE, UM 2, Inrap)

Une vingtaine de scientifiques

Directeur : Christopher Carcaillet,
christopher.carcaillet@univ-montp2.fr
www.umr5059.univ-montp2.fr

UMRASM

Archéologie des Sociétés Méditerranéennes - ASM

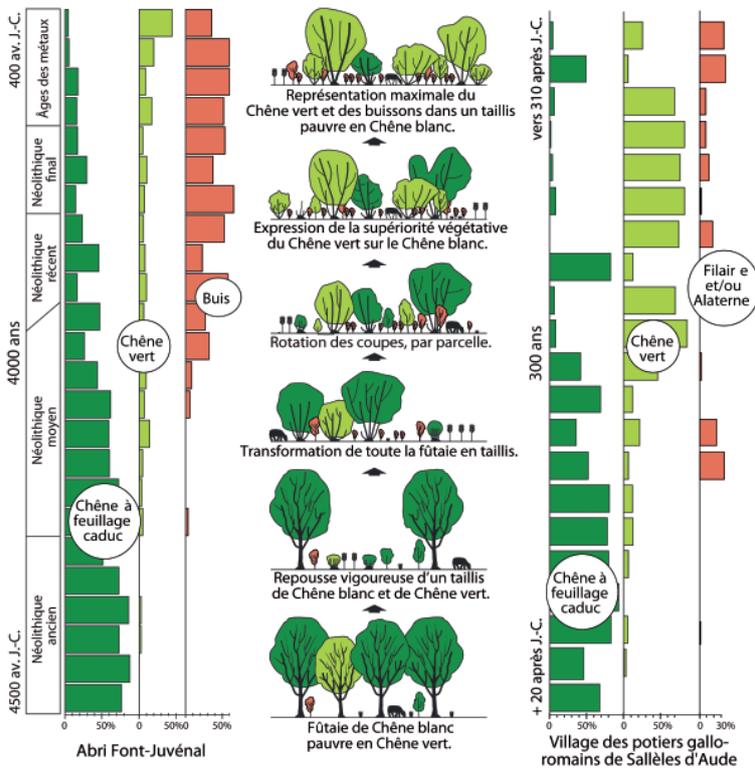
(CNRS, ministère de la Culture et
de la Communication, UM3, Inrap)

Une centaine de scientifiques

Directeur : Pierre Garmy,
pgarmy@wanadoo.fr
www.archeo-lattes.cnrs.fr

... suite page 42

Les charbons de bois nous racontent l'histoire de la chênaie méditerranéenne



Évolution des proportions entre les essences ligneuses dans les charbons de bois de deux sites archéologiques de l'Aude (France).

Les paysages méditerranéens actuels sont le dernier mot d'une longue histoire. Depuis le Néolithique, les coupes de bois pratiquées par les sociétés agropastorales et proto-industrielles ont modifié la structure de la végétation. Couper la forêt ne l'élimine pas : les feuillus ont l'aptitude à rejeter vigoureusement de souche pour former des taillis. Au Néolithique ancien, les futaies riches en chêne caducifolié (probablement le chêne blanc) ont été coupées par parcelle pour permettre la récolte du bois, une agriculture essartée et une dépaissance en forêt. Les souches rejetaient aussitôt pour donner des taillis vigoureux. De génération en génération, ces taillis ont été coupés par parcelle au gré de rotations et de révolutions d'exploitation agrosylvopastorale ou d'exploitations plus spécifiques comme le charbonnage. Or, le chêne vert rejette mieux de souche que le chêne blanc : il finit donc par dominer, avec des espèces buissonnantes comme le buis ou les filaires. Cet effet de supériorité végétative du chêne vert sur le chêne blanc est un processus réversible, qui se produit en début d'occupation de chaque site, avec des cinétiques différentes selon l'intensité de l'exploitation. Sauf là où le feu, ou l'érosion, ont dénudé les sols, des chênaies de chêne vert se sont maintenues presque pures pendant des siècles, ce qui a marqué durablement les paysages.

Depuis 50 ans, les artisanats grand consommateurs de bois et le pâturage sont en déclin : on observe que le chêne blanc se régénère au détriment du chêne vert. Cette longue histoire est inscrite dans les sols sous forme de charbons de bois. Ces charbons de bois, résidus de la combustion pour un usage domestique ou artisanal, constituent un enregistrement stratigraphique précis. Ils peuvent être datés au carbone 14 et leur structure anatomique est conservée sans altération, ce qui permet d'identifier les essences ligneuses dont ils sont originaires. Ces études « anthracologiques » permettent ainsi de retracer les transformations des forêts au cours des derniers millénaires.

Contacts : Lucie Chabal, chabal@univ-montp2.fr
 Laurent Fabre, laurent.fabre@inrap.fr
 Isabel Figueiral, isabel.figueiral-rowe@inrap.fr

Augmentation de la fréquence des feux et pédogenèse

Depuis 2003, le CBAE coordonne dans les Alpes des recherches qui ont pour objectif d'explorer le fonctionnement des systèmes écologiques à l'échelle des bassins versants. Ces recherches mettent l'accent sur les relations à long terme entre couvert végétal, incendies et dynamique des communautés végétales et des sols. Elles s'appuient sur des archives « sols » et « sédiments » : analyses anthracologiques, analyses géochimiques des éléments majeurs (p. ex. fer, aluminium, silice, carbonates) et des Terres Rares, et mise en oeuvre d'indicateurs d'érosion (p. ex. la susceptibilité magnétique). Ces recherches ont permis de mettre en évidence plusieurs phases dans l'évolution récente des massifs forestiers : des phases de construction des sols après la déglaciation des massifs, suivi de la mise en place des systèmes forestiers et de l'altération des sols (podzolisation) durant environ 1 500 ans.

Des accidents écologiques, associés à des accroissements rapides de la fréquence des feux naturels, ont contribué à modifier la composition et la structure du couvert végétal. Il s'en est suivi, dans un laps de temps très court de quelques décennies seulement (< 300 ans), un accroissement de l'érosion, puis des changements au niveau des sols des bassins versants, avec comme fait notable une dépodzolisation et une pédogenèse alors orientée vers des sols bruns. Les bassins versants qui n'ont pas subi ces accidents écologiques ont été le siège d'une très grande stabilité écosystémique, tant au niveau des sols que du couvert végétal. Il apparaît que les feux seuls ne modifient pas



O. Blarquez © UMR CBAE

la composition des forêts et des sols, mais qu'un accroissement de la fréquence des feux altère durablement l'écosystème. Ces résultats résonnent à l'heure des changements climatiques en cours, qui se traduiront dans les décennies à venir par des risques accrus d'incendies en raison des sécheresses attendues plus fréquentes.

Contact :
 Christopher Carcaillet, christopher.carcaillet@univ-montp2.fr

Milieus, territoires et sociétés dans le delta du Lez au cours des six derniers millénaires

À 700 mètres du site de la ville antique de *Lattara* au cœur du delta du Lez (France), la fouille archéologique préventive de Port-Ariane est l'exemple d'une démarche pluridisciplinaire qui a permis d'appréhender l'évolution d'un milieu « naturel » avant la fondation d'un site urbain, pendant son occupation et après son abandon. La séquence stratigraphique de près de 6 mètres de puissance a mis au jour le fonctionnement plurimillénaire du fleuve. Trois épisodes de stabilité hydrologique ont été identifiés, marqués par un ralentissement des apports sédimentaires et le développement de sols alluviaux. Le premier se situe au Néolithique moyen, avec une occupation chasséenne (4 000 av. J.-C.), en conformité avec les données archéologiques régionales. Le second débute au Néolithique final (2 500 av. J.-C.), avec des indices d'habitat confirmés par les analyses palynologiques signalant à la même période une destruction volontaire du couvert végétal. Pendant près de 1 500 ans, l'abandon du lieu correspond à une phase de déprise régionale déjà connue. La fin de l'âge du Bronze (900 av. J.-C.) voit la succession de plusieurs occupations de courte durée entrecoupées de phases d'interruption plus longues (150 à 300 ans).

Dès la fondation du comptoir portuaire de *Lattara* au VI^e siècle av. J.-C. et surtout à partir du IV^e siècle av. J.-C., son emprise se fait sentir par les traces de mise en valeur agricole de son terroir. Le vignoble de près de deux hectares, établi en



Vignoble du II^e siècle avant JC, mis au jour près du comptoir protohistorique de Lattara, Hérault, France. Densité de plantation d'environ 10 000 plants par ha avec tranchées de provignage.

C. Jung © INRAP

contexte hydromorphe à la fin du III^e siècle av. J.-C., en constitue l'illustration. Après l'abandon d'un établissement gallo-romain, une phase de réactivation des débordements du Lez s'achève aux XI^e-XII^e siècle et entraîne une mutation majeure de l'hydrosystème. Au troisième épisode de stabilité, marqué par d'intenses aménagements hydrauliques médiévaux succède la phase de péjoration hydroclimatique du Petit Âge Glaciaire. L'un des apports de cette opération fut de noter une permanence de l'occupation au cours des six derniers millénaires malgré les contingences d'un milieu ayant connu des modifications profondes et rapides.

**Contacts : Isabelle Daveau, isabelle.daveau@inrap.fr
Christophe Jorda, christophe.jorda@inrap.fr**



La mesure des propriétés physiques des sols montre que leur capacité d'infiltration est plus élevée sur les buttes que dans le reste du sol, réduisant le ruissellement et donc l'érodibilité.

D. McKey © UMR CEFE

Les champs surélevés précolombiens des savanes côtières de Guyane

En Amazonie, comme ailleurs dans la ceinture intertropicale, certains habitats qualifiés de « naturels » sont en fait des paysages remaniés par l'homme au cours de la préhistoire. Les agriculteurs précolombiens ont transformé les savanes côtières inondables des Guyanes en y édifiant des champs de buttes, parfois de billons, dont le sol reste au dessus du niveau de l'eau durant la saison humide. D'après les données archéologiques disponibles, ces structures datent pour la plupart de l'époque Arauquinoïde (entre 600 et 1 300 apr. J.-C.).

Pour tenter d'expliquer comment ces complexes de buttes persistent dans le paysage après plus de dix siècles sous climat tropical (3 000 mm de précipitations annuelles) et comment elles influencent le fonctionnement actuel des savanes guyanaises, des recherches sur un financement du programme « Amazonie » (CNRS) sont menées par le CEFE en lien avec ses partenaires français (UMR Archéologie des Amériques, Université de Nanterre), allemands (Département de physique des sols, Université de Bayreuth) et anglais (Équipe d'archéobotanique et de paléoécologie, Université d'Exeter). Ce consortium développe à cette fin des approches interdisciplinaires qui incluent archéologie, archéobotanique, paléoécologie, écologie, science du sol, télédétection, etc.

Les données archéobotaniques montrent que le maïs a été cultivé de manière intensive sur ces buttes. À quelle époque, par qui et comment étaient-ils cultivés ? Pourquoi fut-il abandonné ? Les données pédologiques et écologiques suggèrent que le fonctionnement de ces structures s'est maintenu dans le temps grâce à des phénomènes de feedback : l'hétérogénéité créée par l'homme aurait induit une hétérogénéité du fonctionnement biologique des sols (concentration des activités des ingénieurs naturels du sol : insectes sociaux, vers de terre, plantes) et des effets feedback sur le fonctionnement et l'auto-maintien de ces structures.

L'étude des « systèmes socio-écologiques » tels que ces champs de buttes est essentielle pour comprendre la résilience des systèmes écologiques, la dynamique des actions et rétroactions des ingénieurs de l'écosystème (y compris l'homme) et, au final, pour un développement durable qui combine production alimentaire et conservation de la biodiversité.

Contact : Doyle McKey, doyle.mckey@cefe.cnrs.fr

Autres équipes concernées par ce thème

UMR Eco&Sols
Écologie fonctionnelle
et biogéochimie des sols
(IRD, Inra, Montpellier SupAgro)
45 scientifiques
Directeur : Jean-Luc Chotte,
jean-luc.chotte@ird.fr

UMR EMMAH
Environnement Méditerranéen et
Modélisation des Agro-Hydrosystèmes
(Inra, UAPV)
37 scientifiques
Directrice : Liliana Di Pietro,
dipietro@avignon.inra.fr
www.avignon.inra.fr/les_recherches_1/liste_des_unites/emmah_environnement_mediterraneen_et_modelisation_des_agro_hydrosystemes

Un système d'information pédologique pour la conservation, la promotion et la valorisation des données sur les sols : l'exemple du Languedoc-Roussillon

Les sols sont le résultat d'une longue évolution qui a impliqué plusieurs facteurs naturels et anthropiques en interaction. Il n'est donc pas surprenant de constater que les sols varient beaucoup dans le paysage. C'est particulièrement le cas dans les régions méditerranéennes marquées par des histoires géologiques complexes et des occupations précoces par les hommes.

Depuis les débuts de leur discipline, les pédologues analysent cette variabilité et la présentent sous des formes accessibles aux utilisateurs potentiels. Jusqu'à dans les années 80, la diffusion de ces travaux se faisait sous forme de cartes pédologiques dessinées sur du papier et associées à une notice. À l'heure actuelle, la demande de données sur les sols devient importante pour la gestion agro-environnementale. Il est donc urgent d'organiser l'information contenue dans ces cartes « papier » sous une forme suffisamment structurée pour permettre leur sécurisation et leur valorisation.

À cet effet, la base de données « sol » du Languedoc-Roussillon développée par l'UMR LISAH, constitue un exemple abouti de mise à disposition de l'information contenue dans les cartes pédologiques à l'échelle d'une région. Trois grands types de données sont mis à la disposition des utilisateurs :

- Un répertoire des études pédologiques fait l'inventaire des travaux menés dans le domaine (220 études en Languedoc-Roussillon) ;

- Un référentiel régional pédologique propose un zonage et une caractérisation des « sols et paysages » sur la base d'un découpage des pédopaysages au 1/250 000 répondant au cahier des charges du programme « Inventaire, Gestion et Conservation des Sols » (IGCS) ;

- Des données sols à caractère stationnel consistent en des descriptions et analyses physico-chimiques caractérisant les divers sols identifiés.

Un site Internet (« Sol et paysage du Languedoc-Roussillon ») a été développé à partir des informations contenues dans cette base de données et d'une photothèque. Il permet à une large gamme de visiteurs non-initiés à la pédologie de découvrir les caractéristiques des couvertures pédologiques de leur région et d'acquérir des notions de bases sur la pédologie et l'analyse des paysages.

**Contacts : Michel Bornand, michel.bornand0152@orange.fr
Jean-Pierre Barthès, barthes@supagro.inra.fr, Sylvie Barthès, sylvie.barthes@languedocroussillon.chambagri.fr
Philippe Lagacherie, lagache@supagro.inra.fr**

Pour plus d'informations sur la base de données sol du Languedoc Roussillon, <http://sol.ensam.inra.fr/BdSolLR>

Pour plus d'informations sur le programme IGCS, www.gissol.fr/programme/igcs/rrp.php

Pour plus d'informations sur le site « Sol et paysage du Languedoc-Roussillon », www.umar-lisah.fr/Paysages

Étude des sociétés méditerranéennes et de leur environnement de la Préhistoire au Moyen-Âge

L'UMR *Archéologie des Sociétés Méditerranéennes* (ASM, CNRS, ministère de la Culture et de la Communication, UM3, Inrap), basée à Lattes (Hérault, France) regroupe six équipes de recherche entièrement vouées à l'étude des sociétés et de leur environnement dans le bassin méditerranéen, de la Préhistoire au Moyen-Âge :

- Préhistoire méditerranéenne et africaine ;
- Protohistoire méditerranéenne ;
- Égypte nilotique et méditerranéenne ;
- Archéologie des milieux et des ressources ;
- Techniques de production et consommation ;
- Territoires, interactions, culture.

Ces équipes déploient un large spectre de disciplines et compétences, et elles font également appel à des spécialistes des sciences de la terre (géoarchéologues, sédimentologues), de l'anthropologie physique et de la paléobotanique (palynologues,

anthracologues, carpologues). En ce qui concerne l'économie vivrière, l'archéozoologie (faune terrestre et ichtyofaune) est aussi mise à contribution.

Les principaux axes de recherche concernent les formes et fonctions des habitats, les pratiques funéraires et les cultures matérielles**. Les structures conservées dans les sols permettent d'étudier les premières formes d'habitats au paléolithique, puis celles des premiers villages, l'urbanisme des premières agglomérations et les matériaux de construction utilisés (terre crue, bois et pierre). Des déchets domestiques de toute nature (vaisselle, outillage lithique ou métallique, petits objets de la vie quotidienne, restes de consommation animale et végétale) sont conservés dans les sols d'habitats (maisons et voies de circulation) et nous renseignent sur les habitudes de consommation, les modes de vie, l'économie vivrière et le commerce. Les nécropoles sont riches de renseignements sur les rites funéraires pratiqués, les formes d'organisation et de hiérarchisation des sociétés.

Une attention particulière est portée aux sociétés indigènes et à leurs

relations avec leurs partenaires méditerranéens depuis la fin de l'âge du bronze (v. 900 av. J.-C.) jusqu'à l'époque augustéenne (1^{er} siècle apr. J.-C.). Les dynamiques de peuplement et les techniques de production depuis l'extraction du matériau (pierre, argile, métal) jusqu'aux circuits de diffusion et de consommation font également partie des problématiques de recherche du laboratoire.

L'étude des interactions sociétés-milieux constitue une thématique transversale de recherche. Le littoral du Bas-Languedoc (France) est un milieu d'interface particulièrement instable. Ces changements d'environnement peuvent être suivis à travers les dynamiques morpho-sédimentaires lagunaires et fluviales, les évolutions de la végétation et les modalités de mise en valeur du territoire (traces de plantations et de culture, réseaux fossoyés, élevage). L'UMR s'attache à mettre en parallèle les formes et dynamiques de peuplement et d'occupation du sol au cours de la deuxième moitié de l'holocène (depuis 4 500 av. J.-C.) avec les processus actifs qui se déroulent dans les paléomilieux. ■

** S'entend de tout objet façonné, modifié ou ayant servi à l'être humain.

Thématiques couvertes par les équipes de recherche

(Mai 2009)

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

1. Les sols produisent l'alimentation et l'habillement des hommes
2. Les sols régulent l'écoulement des eaux continentales
3. Les sols régulent les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs et des polluants
4. Les sols sont des milieux vivants dont les organismes assurent de nombreuses fonctions
5. Les sols enregistrent l'histoire des hommes et des écosystèmes

Unités	1	2	3	4	5
BRGM Montpellier - Service Géologique Régional Languedoc-Roussillon Marc Audibert		•			
Centre LGEI - Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel et des risques industriels et naturels (EMA) Miguel Lopez-Ferber		•	•		
CMGD - Centre des Matériaux de Grande Diffusion (EMA) Yannick Vimont		•			
UMR ASM - Archéologie des Sociétés Méditerranéennes (CNRS, ministère de la Culture et de la Communication, UM 3, Inrap) Pierre Garmy					•
UMR CBAE - Centre de Bio-Archéologie et d'Écologie (CNRS, EPHE, UM 2, Inrap) Christopher Carcaillet					•
UMR CEFE - Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CNRS, UM1, UM2, UM3, Montpellier SupAgro, Cirad, EPHE) Jean-Dominique Lebreton	•	•	•	•	
UMR Eco&Sols - Écologie fonctionnelle et Biogéochimie des Sols (Inra, IRD, Montpellier SupAgro) Jean-Luc Chotte	•		•	•	•
UMR G-EAU - Gestion de l'eau, acteurs et usages (AgroParisTech/Engref, Cemagref, CIHEAM/IAM.M, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro) Patrice Garin		•	•		
UMR LISAH - Laboratoire d'étude des Interactions Sol, Agrosystème et Hydrosystème (Inra, IRD, Montpellier SupAgro) Marc Voltz		•	•		
UMR - LMGC - Laboratoire de Mécanique et Génie civil Équipe « Couplages en Milieux Hétérogènes » (CMH) (UM2, CNRS) Moulay El Youssof		•			
UMR LSTM - Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (Cirad, Montpellier SupAgro, UM2, IRD, USC Inra) Bernard Dreyfus				•	
UMR SYSTEM - Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens (Cirad, Inra, Montpellier SupAgro) Jacques Wery	•	•	•	•	



*Andosol ferrallitique
des hautes terres d'Antsirabé,
Madagascar*

B. Jaillard © Inra

Unités	1	2	3	4	5
UPR - Systèmes de semis direct sur couverture végétale (SCV) (Cirad) Francis Forest	•		•		
UPR - Dynamique des forêts naturelles (Cirad) Sylvie Gourlet-Fleury	•				
UPR - Risque environnemental lié au recyclage (Cirad) Hervé Saint Macary		•	•		
UPR - Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantation (Cirad) Jean-Pierre Bouillet	•	•	•		
US - Analyse des eaux, sols et végétaux (Cirad) Alain Aventurier	•	•	•		

Unités partenaires d'Agropolis International

Unités	1	2	3	4	5
UMR EMMAH - Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (Inra, UAPV) Liliana Di Pietro	•	•	•	•	•
UR - Plantes et Systèmes de culture Horticoles (PSH) (Inra Avignon) Michel Génard	•				

Les formations à Agropolis International

dans le domaine des sols

Agropolis International, à travers ses établissements membres (universités, instituts de recherche, écoles d'ingénieurs et institutions spécialisées dans la formation continue), propose une offre très large de formation.

Cela représente plus de 80 formations diplômantes (de bac +2 à bac +8 : technicien, ingénieur, licence, master, doctorat...) ainsi qu'une centaine de modules de formation continue (préexistants ou à la carte).

Les tableaux présentés ci-après détaillent les formations relevant du domaine des sols. Ils précisent les niveaux de diplômes, les intitulés des formations et les établissements opérateurs.

Les formations diplômantes

Niveau	Diplôme	Intitulé de la formation et spécialité	Établissement
Bac +3	Licence	Sciences de la Terre et de l'Environnement	UM2
		Sciences de la Terre et de l'Environnement	UPVD
	Licence professionnelle	Agriculture raisonnée	Montpellier SupAgro, UM1
		Viticulture raisonnée	Montpellier SupAgro, UM3
		Analyse chimique appliquée à l'environnement	UM2
		Maintenance appliquée au traitement des pollutions	UPVD
		Métiers du démantèlement, de la gestion des déchets et de la dépollution	UM1, Université de Nîmes
Bac +5	Master recherche	Sciences de la Terre et de l'environnement	UM2
		Biologie, Géosciences Agroressources, Environnement (BGAE), parcours « Biodiversité, écologie, évolution » (BEE), « Fonctionnement des écosystèmes naturels et cultivés » (FENEC), « Systèmes microbiens » (SM)	UM1, UM2, Montpellier SupAgro
		Préhistoire, Protohistoire Paléoenvironnement (PPP)	UM3
	Ingénieur	Ingénieur agronome, spécialisations « Gestion de l'eau, des milieux cultivés et de l'environnement » (GEME), « Productions végétales durables » (PVD)	Montpellier SupAgro
		Ingénieur forestier, spécialité « Gestion environnementale des écosystèmes et forêts tropicales » (GEEFT), option « Foresterie rurale et tropicale » (FRT)	AgroParisTech-Engref
	Master professionnel	Agriculture, Agronomie et Agro-alimentaire (AAA) - Spécialités « Production et évaluation des systèmes de production agricole » (CESPA), « Systèmes agraires tropicaux et gestion de développement » (SAT) « Gestion environnementale des écosystèmes et forêts tropicales » (GEEFT)	Montpellier SupAgro, Cirad, AgroParisTech-Engref
		Biologie, géosciences, agroressources, environnement (BGAE), parcours « Développement et Aménagement Intégré des Territoires » (DAIT), « Géorisques »	UM2
	Master européen	Développement agricole durable / <i>Sustainable development in agriculture</i> (AGRIS MUNDUS)	Montpellier SupAgro 5 universités européennes
		Foresterie tropicale durable / <i>Sustainable tropical forestry</i> (SUTROFOR)	AgroParisTech-Engref 4 universités européennes

Niveau	Diplôme	Intitulé de la formation et spécialité	Établissement
Bac +6	Master spécialisé CGE	Développement Agricole Tropical (DAT), option « Agronomie et innovations en milieu rural » (AGIR)	Montpellier SupAgro-IRC
		Forêt, nature et société, option tropicale	AgroParisTech-Engref
	Ingénieur spécialisé	Ingénieur GREF, Voie d'approfondissement « Forêt, nature et société », option tropicale	AgroParisTech-Engref
		Ingénieur en agronomie tropicale, option « Agronomie et innovations en milieu rural » (AGIR)	Montpellier SupAgro-IRC
	Formation spécialisée	Environnement et sécurité, option sécurité et environnement miniers (formation réservée aux professionnels étrangers)	CESMAT / EMA

Les formations courtes non diplômantes

Établissement	Intitulé de la formation
Montpellier SupAgro	Fonctionnement biologique des sols (4,5 jours)
Cirad	Impact agronomique et environnemental de la gestion des matières organiques en milieu tropical (5 jours)
	Racinsitu : caractérisation du développement racinaire <i>in situ</i> des cultures annuelles et pérennes (5 jours)
	Transferts d'eau et de soluté dans les sols : un modèle de transfert biogéochimique HP1 (couplage de Hydrus et Phreeqc) (5 jours)
Cirad / Université d'État de Ponta Grossa, Brésil	Semis direct sur couverture végétale (3 semaines)
EMA	Formation juridique dans le domaine des sites et des sols pollués (3 jours)
	Bases de chimie de l'environnement (4 jours)
	Les servitudes (1 jour)
	Les sols pollués (3 jours)
	Météorologie des eaux et des sols pollués (5 jours)
	Outils de diagnostic (3 jours)
	Surveillance des eaux souterraines et comportement des polluants (2 jours)
	Traitement des eaux usées industrielles (4 jours)
	Approche pratique à l'inspection des carrières (5 jours)
	Hydrologie-Hydrogéologie (5 jours)
	Impact hydraulique des carrières (4 jours)

Les formations à Agropolis International

École doctorale en rapport
avec le sol



© IRD

*Prélèvement de l'eau du sol
sous atmosphère d'azote
dans une rizière
du nord-est de la Thaïlande*

D'une durée de trois ans, le doctorat sanctionne un travail de recherche dans un laboratoire. Tout étudiant s'inscrivant en doctorat est en outre rattaché à une école doctorale. Les écoles doctorales regroupent les unités de recherche ou laboratoires d'accueil autour de grandes thématiques. Elles ont pour mission, outre l'encadrement scientifique direct des doctorants, d'offrir des compléments de formation apportés pendant les trois années de préparation de la thèse sous forme de séminaires et conférences scientifiques et de modules de formation.

Ces modules ont pour but d'améliorer la formation scientifique des doctorants et de mieux préparer leur avenir professionnel.

Une seule école doctorale est principalement concernée par la thématique du « Sol » :

École doctorale
*« Systèmes Intégrés en
Biologie, Agronomie,
Géosciences,
Hydrosciences,
Environnement »*
(SIBAGHE)

L'école doctorale SIBAGHE est une école de l'UM2 pour les Sciences de la Vie et de la Terre. Elle est co-accréditée avec Montpellier SupAgro, AgroParisTech et l'Université d'Avignon pour les Sciences agronomiques et environnementales, avec les universités UM1 et UPVD pour la génomique et le développement végétal, la microbiologie et la parasitologie.

L'école doctorale SIBAGHE compte environ 390 doctorants et s'appuie sur 45 unités de recherche qui lui sont rattachées, 350 encadrants et plusieurs équipes de recherche extérieures associées.

Chaque étudiant de l'école doctorale SIBAGHE doit justifier du suivi de deux modules de formation scientifique et de deux modules d'ouverture professionnelle. L'école doctorale gère les inscriptions en thèse, assure le suivi des doctorants, veille au respect de la charte de thèse et organise les cours de thèse et l'aide à l'insertion professionnelle. Elle est assistée d'un conseil et gérée par un bureau.

Contacts et coordonnées

**École doctorale « Systèmes Intégrés
en Biologie, Agronomie, Géosciences,
Hydrosciences, Environnement »
(ED SIBAGHE)**

(UM2, Montpellier SupAgro, Agro ParisTech,
Université d'Avignon, UM1, UPVD)

Martine Barraud, UM2,

barraud@isem.univ-montp2.fr

Joëlle Lopez, UM2,

joelle.lopez@univ-montp2.fr

www.sibaghe.univ-montp2.fr



1. Stage de formation à la découverte des sols, Burkina-Faso, région de Zabré

2. Une joyeuse équipe de recherche franco-thaïlandaise

3. Formation d'étudiants thaïlandais à la description d'un profil de sol (nord-est de la Thaïlande)

4. Stage de formation à la découverte des sols, Brésil

Liste des acronymes *et abréviations*

BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Cemagref	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
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
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CORUS	Programme de coopération pour la recherche universitaire et scientifique
EMA	École des Mines d'Alès
Engref	École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts
EPHE	École pratique des Hautes Études
ETM	Éléments Traces Métalliques
Inra	Institut national de la recherche agronomique
Inrap	Institut national de recherches archéologiques préventives
IRD	Institut de recherche pour le développement
ISRA/UCAD	Institut sénégalais de recherche agricole/Université Cheikh Anta Diop, Sénégal
SCV	Semis direct sous couverture végétale
UAPV	Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
UCLA-DOE	<i>University of California, Los Angeles - Department of Energy</i>
UM1	Université Montpellier 1
UM2	Université Montpellier 2
UM3	Université Montpellier 3
UMR	Unité mixte de recherche
UPR	Unité propre de recherche
UR	Unité de recherche
US	Unité de service

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

AgroParisTech/Engref
BRGM
Cemagref
CIHEAM/IAM.M
Cirad
CNRS
EMA
EPHE
Inra
Inrap
IRD
Montpellier SupAgro
UAPV
UM1
UM2
UM3
UPVD
UNîmes

Directeur de la publication : Bernard Hubert

Coordinateurs scientifiques : Benoît Jaillard (Inra) et Roland Poss (IRD)

Coordinateur Agropolis International : Chantal Dorthe

Édition : Isabelle Amsallem (Agropolis Productions)

Iconographie : Nathalie Villeméjeanne (Agropolis International)

Ont participé à ce numéro : Karine Alary, Patrick Andrieux, Marc Audibert, Alain Aventurier, Pierre-Alain Ayrat, Daniel Babre, Jean Stéphane Bailly, Martine Barraud, Jean-Pierre Barthès, Sylvie Barthès, Jean-Claude Bénet, Éric Blanchart, Philippe Blanchemanche, Michel Bornand, Sami Bouarfa, Jean-Pierre Bouillet, Gérard Bourgeon, Alain Brauman, Christopher Carcaillet, Lucie Chabal, Jean-Luc Chotte, Cathy Clermont-Dauphin, Anne-Lise Courbis, Isabelle Daveau, Jean-François Desprats, Liliana Di Pietro, Emmanuel Doelsch, Mireille Dosso, Jean-Jacques Drevon, Bernard Dreyfus, Christian Dupraz, Moulay El Youssoufi, Laurent Fabre, Isabel Figueiral, Stéphane Follain, Francis Forest, Vincent Freycon, Nathalie Fromin, Pierre Garmy, Patrice Garin, Pierre Gaudon, Michel Génard, Cécile Gomez, Catherine Gonzales, Sylvie Gourlet-Fléury, Patrice Guillaume, Jean-Michel Harmand, Philippe Hinsinger, Stephan Hattenschwiler, Benoît Jaillard, Christophe Jorda, Christophe Jourdan, Jean-Paul Laclau, François Lafolie, Philippe Lagacherie, Gisèle Laguerre, Rabah Lahmar, Lydie Lardy, Yves Le Bissonnais, Jean-Dominique Lebreton, François Lecompte, Miguel Lopez-Ferber, Xavier Louchart, Jean-Claude Mailhol, Serge Marlet, Doyle McKey, Aurélie Metay, Laurent Misson, Elisabeth Navarro, Marc Neyra, James Ollivier, Jean-Marc Ourcival, Loïc Pagès, Pascal Podwojewski, Claude Plassard, Yves Prin, Serge Rambal, Jacques Roy, Pierre Ruelle, Laurent Saint-André, Hervé Saint Macary, Éric Scopel, Marc-André Seloche, Evelyne Touraud, Bernard Vayssade, Gilles Vercaambre, Cécile Villenave, Marc Voltz

Remerciements pour l'iconographie : tous les contributeurs au dossier

Conception, mise en page et infographie : Olivier Piau (Agropolis Productions)
agropolisproductions@orange.fr

Impression : Les Petites Affiches (Montpellier)
ISSN : 1628-4240 • Dépôt légal : Juin 2009

Sur le même domaine, vous pouvez également consulter :

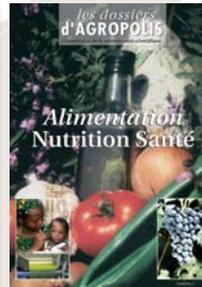
■ Suds en ligne, dossier thématique de l'IRD :
www.mpl.ird.fr/suds-en-ligne/soils/index.html

■ Éditions Quae, ouvrage « Le Sol », (directeurs éditoriaux Pierre Stengel, Laurent Bruckler, Jérôme Balesdent)
www.quae.com

Déjà parus dans la même collection



Mai 2001
24 pages
Français et Anglais



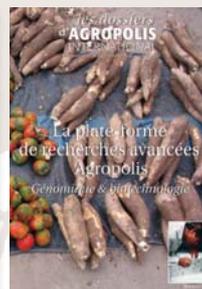
Septembre 2005
60 pages
Français et Anglais



Novembre 2005
56 pages
Français et Anglais



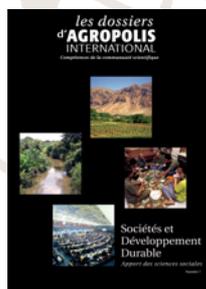
Mars 2007
60 pages
Français et Anglais



Mars 2007
64 pages
Français et Anglais



Octobre 2007
68 pages
Français et Anglais



Décembre 2008
68 pages
Français et Anglais

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.



AGROPOLIS
INTERNATIONAL

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