

Faits et chiffres

- Le sol n'est pas une ressource renouvelable : on estime la vitesse moyenne de formation d'un sol de 0,1 à 0,02 mm/an, alors que l'érosion moyenne exporte 1 mm de sol en un an.
- La ressource en sols cultivables est limitée : 22 % des surfaces des terres émergées.
- Toutes zones bioclimatiques confondues, sur les terres nouvellement ouvertes à l'agriculture, les pertes annuelles cumulées de productivité végétale sont estimées à 5 %.
- Depuis 1984, les expérimentations sur les sols tropicaux montrent que la perte de rendement est liée de manière exponentielle à l'érosion.
- Toutes causes confondues, 3,77 milliards d'hectares sont concernés par des dégradations diverses des sols. Une partie de la dégradation est liée à des processus naturels sur lesquels l'homme a peu de moyens directs d'action.
- En régions arides et semi-arides, l'accélération de l'érosion pluviale et éolienne est liée à l'action humaine. L'érosion éolienne concerne 30 millions de km².
- En Afrique, faute d'apports, il est nécessaire d'étendre les surfaces cultivées pour maintenir un même revenu. La population agricole mondiale représente environ 1,3 milliard de paysans, dont 1 milliard sans accès aux progrès et offres techniques.
- Les sols à faibles réserves minérales représentent environ 36 % des surfaces tropicales. Cela concerne les tropiques humides et les savanes. Les 64 % restants ne présentent pas de contraintes chimiques fortes à la production végétale ! Les problèmes rencontrés dans l'agriculture ne sont donc pas uniquement techniques...

Pédologues étudiant une coupe de sol, Mexique.



Les terricules produits par *Pheretima leucocirca*, une espèce de vers anécique, peuvent atteindre des tailles remarquables. Leur accumulation à la surface du sol peut conduire à la création d'un horizon granulaire d'environ 5 cm d'épaisseur.

Des ingénieurs du sol à l'écosystème

Agir localement et penser globalement... Ne serait-ce pas la devise adoptée par les chercheurs de l'unité de recherche *Biodiversité et fonctionnement du sol* (UR137¹) ? En se déplaçant dans le sol, termites, fourmis ou vers de terre construisent des structures organo-minérales (nids de termites ou de fourmis, galeries...) qui jouent un rôle clé dans le maintien et la dynamique de l'hétérogénéité des écosystèmes. Ces structures « biogéniques » sont perçues comme des îlots d'activité biologique où les processus fonctionnels du sol, comme les cycles de l'eau, du carbone et de l'azote, diffèrent de ceux du sol environnant. Différentes sphères d'influence ont été identifiées en fonction de caractéristiques tels l'hydrodynamisme (infiltration, rétention de l'eau) ou la dynamique de la matière organique (minéralisation, humification). Du centimètre au mètre cube, ce découpage en sphères d'influence localisées ne permet pas toujours d'appréhender ce qui se passe au niveau du paysage et de raisonner plus globalement à l'échelle de l'écosystème. Pour les chercheurs de l'unité *BioSol* en partenariat avec deux universités brésiliennes et un institut vietnamien, la faune du sol influence le fonctionnement des écosystèmes à des échelles spatiales et temporelles qui dépassent celles habituellement considérées. Cer-

taines structures biogéniques interagissent manifestement, voire constituent un réseau qui affecte significativement des processus à l'échelle du paysage, comme l'érosion ou la répartition des espèces végétales. Par exemple, « les palmiers ont des racines qui cherchent les nutriments au hasard dans les sols. Lorsqu'elles rencontrent une termitière, il y a alors prolifération. Au final, la relation est très forte entre la distribution des termitières et celle des palmiers », précise Pascal Jouquet, de l'unité de recherche *BioSol*. En modifiant la porosité par la création de galeries et/ou en créant localement une rugosité à la surface des sols (rejet de terricules), l'activité biologique influence localement la stabilité structurale et l'infiltration de l'eau, et, de ce fait, la conservation des sols à l'échelle d'un bassin versant. La poursuite de ces travaux consiste à étudier comment favoriser cette activité et se servir de l'hétérogénéité pour renforcer les lieux où les sols sont les plus fragiles. ●

1. UR137, UMR *BioSol*, IRD, universités de Paris-VI, VII, et XII.

Contacts

Pascal Jouquet
jouquet@bondy.ird.fr
Michel Grimaldi
Michel.Grimaldi@bondy.ird.fr

Les sols

Fragiles pa

Forts d'une expérience reconnue dans le domaine de (pédogénèse) et leur cartographie, les pédologues d'aménagement et d'utilisation des sols, avec la nécessité des recherches développées par les équipes IRD et les constituants du sol, de leur formation, de l'évolution le cadre d'enjeux qui dépassent les strictes problématiques suivent s'inscrivent dans les problématiques des processus d'érosion, et de modifications chimiques, physiques de gestion variés. Ces quelques points illustrent les défis fait partie intégrante des enjeux de la recherche définie

Les sols comme puits d'oxyde nitreux

Pour les chercheurs de l'unité *SeqBio* (UR179) et leurs partenaires du GENA¹ au Brésil et du LRI² à Madagascar, le rôle des sols dans les émissions et la consommation des gaz à effet de serre (GES) serait plus important que prévu. Les activités agricoles et forestières sont certes émettrices de dioxyde de carbone (CO₂), d'oxyde nitreux (N₂O) et de méthane (CH₄), et contribuent pour plus d'un tiers à ces émissions. Néanmoins, des choix faits dans les pratiques agricoles dépendent le stockage du carbone dans le sol et la réduction des émissions de méthane et d'oxyde nitreux. Comprendre ces mécanismes et quantifier les changements induits

par les modes de culture pour ces deux derniers gaz est donc de première importance, puisque leur potentiel de réchauffement est respectivement 20 et 300 fois supérieur à celui du CO₂. Au niveau des sols, le méthane et l'oxyde nitreux sont produits et consommés lors de processus microbiens, comme la nitrification et la dénitrification pour le N₂O et la méthanogénèse et méthanotrophie pour le CH₄. Les flux émis dépendent donc autant des pratiques culturales que de la nature des sols qui influencent les communautés microbiennes fonctionnelles. Cependant, même si les chercheurs entrevoient de nombreuses pistes et mécanismes, le terrain reste largement à explorer. Par

Sel sous pression dans les rizières

Soixante-dix millions d'hectares de la zone tropicale seraient affectés par la salinisation. Au nord-est de la Thaïlande, 3 millions d'hectares de sols de rizière sont concernés par ce phénomène préjudiciable aux cultures. Il est nécessaire d'analyser les processus mis en cause pour déterminer l'évolution de ces systèmes et mieux intégrer les modes de gestion. En collaboration avec le *Land Development Department* et l'université de Khon Kaen, une équipe de l'unité de recherche *Solutions* (UR176) s'attaque au problème par une approche spatiale. En saison sèche, des plaques de terre dénudée de 10 à 100 m² apparaissent dans les rizières. Ce sont des taches salées dues à des efflorescences de chlorure de sodium qui rendent les zones touchées stériles pendant la saison des pluies. Les sels proviennent de dépôts géologiques, dissous et emportés par les circulations d'eau. Comment et pourquoi ? Les chercheurs ont, dans des parcelles paysannes, caractérisé les sols et étudié les transferts d'eau et de sels entre les différents compartiments que sont la surface, le sol, et la nappe souterraine. La caractérisation des sols ainsi que leurs liens avec l'hydrodynamisme ont aidé à comprendre ce qui se passait. Le suivi des transferts hydrosalins pendant la saison des pluies montre en effet que les flux sont ascendants et que, contrairement à ce que l'on observe le plus fréquemment dans les sols salés, la concentration en chlorure de sodium de la solution du sol augmente quand la surface du sol est immergée. Ainsi, la salinité dans la couche de sol où sont implantées les racines des plants de riz augmente de 1 400 % au cours de la saison des pluies. La nappe salée est donc mise sous pression par



Dispositif de mesure des transferts hydrosalins dans une tache salée d'une rizière de Ban Daeng (région de Khon Kaen, nord-est Thaïlande) lors de la saison de culture 2005.

l'augmentation du volume d'eau à la saison des pluies qui provoque des remontées d'eau dans le sol. Normalement bloquées par un niveau extrêmement dense et peu perméable de sable situé à une cinquantaine de centimètres de profondeur, ces remontées gagnent malgré tout la surface par des ruptures existant dans cette couche imperméable. La modélisation des transferts hydrosalins confirme ces mouvements ainsi que la géométrie des taches salines consécutives, observées en surface. Elle montre surtout qu'une gestion précise de l'irrigation par une lame d'eau superficielle peut limiter la remontée salée et préserver ainsi la zone racinaire pendant la période de culture de manière à maintenir de bons rendements rizicoles. ●

Contact

Claude Hammecker
claud.hammecker@gmail.com



L'Amazonie racontée par ses sols

Pour comprendre les processus et les fonctionnements hydro-bio-géochimiques qui ont façonné les surfaces continentales du bassin amazonien et contribué à la diversité des écosystèmes qui les constituent, les chercheurs de l'IRD, du CNRS et des universités de Paris-VI et de São Paulo se sont associés pour analyser et étudier coupes de sols, nappes et rivières des principales unités géomorphologiques du bassin. Les analyses minéralogiques et structurales couplées à l'étude des eaux qui drainent ces unités de paysage ont permis de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la séquestration et la redistribution de matières, et ainsi de relier l'histoire des sols à celle du bassin. Dans les compartiments les mieux drainés du bassin, dépourvus de stagnation d'eau, l'altération tropicale conduit à l'accumulation résiduelle du fer et de l'aluminium. Les

minéraux dans lesquels ces éléments sont séquestrés (argiles et oxydes) ont des paramètres cristallochimiques qui varient progressivement de bas en haut sur les coupes. Ces minéraux se sont donc dissous puis ont recristallisé au cours des temps géologiques. Une datation originale des argiles a ainsi révélé des populations anciennes en profondeur (jusqu'à 30 millions d'années) et des populations plus récentes au voisinage de la surface. Pour comprendre l'effet de la stagnation d'eau sur la remobilisation des éléments chimiques de ces sols, les chercheurs ont également étudié les compartiments les moins bien drainés du bassin où l'eau s'accumule en nappes. Les conditions réductrices et acides qui y règnent sont propices aux accumulations de matières organiques et à la dissolution des oxydes puis des argiles. Les métaux libérés (fer et aluminium) sont complexés par ces matières organiques et redistribués en pro-

Cette coupe de sols illustrant l'avancée d'une zone claire en juxtaposant les photos prises dans une zone claire et colorée de l'amont. À terme, il ne restera que la zone claire rongée par l'acidité et peu propice au développement.

fondeur, à la périphérie de sols blanchis ayant perdu la quasi-totalité de leurs éléments fins altérables, puis exportés aux rivières par les nappes. Ces remobilisations de matières aboutissent ainsi à la formation des célèbres podzols géants du haut bassin amazonien, zones acides à l'écologie très fragile. Importantes dans la partie centrale et surtout en amont du bassin où les pluies sont particulièrement abondantes, elles sont guidées par des structures géologiques plus profondes (essentiellement sédimentaires et tectoniques). L'altération des sédiments et des roches a ainsi pu être reliée à l'histoire du bassin et à son fonctionnement hydrique. Par les redistributions et exportations de matières, les processus agissent directement sur la qualité des sols et des eaux qui les drainent et de ce fait sur les ressources naturelles de cet écosys-

Patrimoines

La connaissance des sols tropicaux, leur formation de l'IRD ont fait évoluer leur activité vers des études de leur fonctionnement. Actuellement, leurs partenaires apportent une connaissance fine de leurs propriétés et de leurs transformations, dans des contextes régionaux. Sans être exhaustifs, les exemples qui illustrent les pressions urbaines, des changements climatiques, des pressions urbaines, des pressions physiques et biologiques des sols pour des milieux et modes de vie actuels qui nécessitent une veille permanente ; celle-ci est assurée par nos partenaires du Sud pour leur développement.

Par exemple, ce n'est que très récemment qu'une nouvelle source de méthane a été identifiée par une équipe allemande. Il serait produit au niveau des feuilles selon un mécanisme qui reste à élucider. Pour le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, le bilan global de l'oxyde nitreux ne tombe pas juste : la quantité nette émise n'est pas égale à celle ajoutée dans l'atmosphère, moins celle captée par la biosphère et celle détruite dans la stratosphère. Où se trouve donc cet oxyde manquant ? Dans les sols, répondent les chercheurs de l'IRD associés à des chercheurs de l'Istom³ et de l'université de Göttingen en Allemagne, qui ont démontré que le rôle des sols comme puits de N₂O a été largement sous-estimé. Cette « nouvelle fonction » du sol permettrait de « boucler » le bilan global du N₂O. Reste à comprendre et

hiérarchiser les mécanismes sous-jacents pour aider les pays du Sud à faire des choix raisonnés en matière d'agriculture et de sylviculture, et ainsi agir sur les flux de gaz à effet de serre.

1. CENA : Centro de energia nuclear na agricultura, université de São Paulo (Piracicaba, Brésil)
2. LRI : Laboratoire des Radio-Isotopes (Antananarivo, Madagascar)
3. Istom : Ecole d'ingénieur d'agro-développement international (Cergy-Pontoise)

Contacts

Lydie Chapuis-Lardy
lardy@ird.mg
Martial Bernoux
Martial.Bernoux@mpl.ird.fr



www.mpl.ird.fr/SeqBio



L'exploitation du nickel (a) sur le site de Niquelândia, Goiás, Brésil, met en danger la biodiversité de ces milieux. Certaines espèces, telles que *Pfaffia sarcophylla* (Amaranthaceae) (b), dont les spécimens collectés accumulent de 1,3 à 9 g/kg de Ni, peuvent être utilisés efficacement pour la réhabilitation de ces sites dégradés.

Une biodiversité nickel, chrome

La présence d'éléments minéraux potentiellement toxiques pour la biosphère est actuellement une des préoccupations majeures concernant la qualité des sols. En particulier, les éléments traces métalliques (ETM), présents naturellement ou apportés par des pollutions, peuvent induire des toxicités pour les plantes et les animaux lorsqu'ils sont biodisponibles, c'est-à-dire présents sous une forme chimique assimilable par les organismes vivants. Diverses plantes, dites métalphytes, ont cependant acquis la capacité de survivre dans les sols riches en métaux. Certaines, dites hyperaccumulatrices, ont même la particularité de concentrer les métaux dans leurs tissus à des teneurs exceptionnelles (jusqu'à 9 gNi/kg chez *Pfaffia sarcophylla*, *Amaranthaceae*, une espèce hyperaccumulatrice brésilienne). Outre la curiosité biologique, ces plantes sont utiles pour la revégétalisation de sites miniers ou contaminés, ainsi que pour diverses technologies environnementales comme la phytoremédiation, la phytostabilisation ou le phytomining. L'UR137 *BioSol*¹ et ses partenaires développent des travaux sur les sols ultramafiques du Goiás au Brésil. Ces recherches analysent les conséquences du fonctionnement biogéochimique de sols métallifères ayant des teneurs élevées en nickel (Ni) et

chrome (Cr) (étude de la localisation des métaux, de leur biodisponibilité, de leur spéciation en solution) sur la biodiversité des espèces métalphytes. Les massifs ultrabasiques du Brésil semblent montrer une certaine originalité par rapport à ceux d'autres régions du monde dans la distribution des teneurs en nickel chez les plantes. Alors qu'on observe généralement une distinction claire des teneurs en nickel dans les parties aériennes des plantes entre des espèces accumulatrices et non accumulatrices (distribution bimodale des teneurs), cette distinction n'apparaît pas au Brésil, où la majorité des plantes présente des teneurs intermédiaires en Ni, cette particularité pouvant être associée à des mécanismes physiologiques encore indéterminés. En outre, dans ces sols, les teneurs particulièrement élevées en chrome (VI) échangeable, la forme toxique de ce métal, laissent supposer une action particulière de cet élément sur les plantes, encore jamais mise en évidence par ailleurs.

1. Unité mixte IRD, universités Paris-VI, VII et XII

Contacts

Thierry Becquer, IRD
becquer@cpac.embrapa.br
Eder de Souza Martins, Embrapa Cerrados
eder@cpac.embrapa.br

Sauvegarder les données pédologiques

Physiquement et thématiquement peu accessibles, les données pédologiques représentent néanmoins un capital important pour de nombreux pays. Elles sont, de plus, souvent mal conservées voire pas du tout. L'unité de service Valpedo (US018) s'est attachée à mettre en place des outils destinés à rassembler et déchiffrer les informations existantes afin de sauvegarder ce patrimoine scientifique. L'actualisation et la valorisation de l'ensemble de ces données ont rendu pertinente leur utilisation dans des travaux de recherche actuels. Évolutif, ces outils s'adaptent aux spécificités thématiques.

Le système d'information comprend trois principaux volets :

- Valsol, la base de données « sols et environnement », rassemble les données existantes par pays, zone géographique ou grande région. Des interfaces Web facilitent l'intégration, la modification et la gestion de la base, développée avec les logiciels du domaine public afin d'être plus aisément diffusée ;
- des systèmes d'information géographique qui offrent la possibilité d'associer informations spatiales géoréférencées et informations présentes dans la base de données ;
- la base de connaissances Miruram-Valpedo qui est un ensemble de pages Web de présentation de l'information pédologique construites à partir des données de Valsol. Interactifs, ces documents disposent d'un moteur de recherche par entrée géographique.

Ces outils sont mis en œuvre dans le cadre de projets à Madagascar (Fofifa), au Brésil (Embrapa) et du GIS Sol pour l'outremer tropical français.

Contact

Hervé Le Martret,
lemart@mpl.ird.fr, us Valpedo



www.mpl.ird.fr/valpedo



Un podzol (sur la gauche) a été réalisée série de fosses creusées sur une centaine en saison des pluies. Les pluies (à droite) attaquent les sols plus argileux et provoquent un engorgement de la vie.

La rencontre des eaux brunes du fleuve Solimões et des eaux noires du fleuve Negro illustre l'importance et la grande diversité des flux de matières exportées par le bassin amazonien : l'érosion mécanique des Andes se mêle à l'exportation de matières organiques et de métaux. Ces exportations témoignent d'un milieu extrêmement interactif dont la connaissance est indispensable à la mise en place d'une gestion durable d'un environnement forestier, localement fragile, soumis à de fortes pressions anthropiques et qui contribue largement à l'équilibre de la planète.

Contacts

Emmanuel Fritsch
emmanuel.fritsch@impmc.jussieu.fr
Etienne Balan
etienne.balan@impmc.jussieu.fr

Déchets des villes, engrais aux champs

Que ce soit à Dakar ou à Ouagadougou, où la population est passée de 172 000 habitants en 1975 à plus d'un million aujourd'hui, les grandes villes d'Afrique de l'Ouest voient l'agriculture périurbaine s'organiser pour satisfaire à la demande des villes. Aussi, ces banlieues assurent leurs propres productions sur des parcelles agricoles peu extensibles. Ces dernières requièrent donc un fort apport d'intrants, engrais et irrigation. Nécessité d'une agriculture intensive et manque de moyens poussent alors ces paysans à recourir à la récupération pour soutenir leur production. Quand les eaux usées sont utilisées pour irriguer les cultures et les déchets urbains domestiques pour les fertiliser, les spécialistes des sols s'interrogent sur les conséquences environnementales tout en cherchant les moyens de minimiser les impacts négatifs.

En proche banlieue de Dakar, la jeune équipe *Agriculture périurbaine des Niayes*, associée à l'UR179 *SeqBio* et sous la responsabilité d'Aliou Guissé (université Cheikh Anta Diop), a identifié une telle zone dédiée aux cultures maraîchères. Sur de petites parcelles s'étageant en pente douce le long des dunes, les productions se succèdent tout au long de l'année, nécessitant une irrigation permanente en raison de la nature très filtrante des sols sableux et du climat. Jadis, la nappe phréatique couvrait les besoins de l'irrigation, mais l'abaissement chronique de son niveau ces dernières années a contraint les maraîchers à recourir à une source abondante et gratuite : les eaux usées non épurées. S'intéressant à l'effet de la pollution azotée (concentration en ammonium) sur le fonctionnement microbiologique du sol, les jeunes chercheurs ont mis en évidence un impact négatif très marqué au niveau des communautés microbiennes responsables de la transformation de l'ammonium en nitrate. Quasiment indétectables en saison sèche dans les parcelles irriguées par

les eaux de nappe, ces communautés sont à nouveau décelables en saison des pluies, mais à un niveau nettement inférieur à celui mesuré dans les parcelles irriguées par les eaux usées. Variations de salinité et pauvreté en ammonium des eaux de la nappe pourraient expliquer cette dynamique de population. Reste une question majeure : cette irrigation par des eaux polluées a-t-elle altéré irrémédiablement le fonctionnement microbiologique des sols ? Les analyses se poursuivent pour trouver une réponse... Réduire l'impact environnemental des eaux usées est aussi au programme. Des essais en serre évaluent le recours à des litières végétales (coques d'arachide, *Faidherbia albida*, *Casuarina equisetifolia*) comme moyen de fixer l'azote excédentaire des eaux d'irrigation, tout en étudiant leurs effets sur la dynamique des agents de nitrification et la productivité agricole.

À quelques milliers de kilomètres plus à l'est, la zone périurbaine de Ouagadougou compte 3 000 hectares de cultures maraîchères. Pour accroître le rendement, les agriculteurs ont recours aux importantes productions de déchets urbains, dont la gestion n'est bien souvent pas organisée. Ces « fertilisants » sont épandus à même les champs, sans tri ni traitement préalable. Outre des matières organiques, ils contiennent bien d'autres éléments potentiellement dangereux pour l'environnement. Les sols sont-ils capables d'absorber ces pollutions et la dynamique de leurs communautés biologiques s'en trouve-t-elle perturbée ? Les premiers résultats du programme *Dussol* (ANR-ECCO) montrent une accumulation de carbone en surface et des teneurs en métaux lourds relativement élevées mais en dessous des seuils de toxicité dangereux. Il n'est cependant pas possible pour l'instant de déterminer la mobilité et le devenir de ces métaux, ainsi que les pollutions induites par ces pratiques. Valoriser ces déchets dans l'agriculture, certes, mais il reste aux cher-



Déchets répandus sur le sol en zone périurbaine.

cheurs à étudier leurs transformations en fertilisants organiques dépourvus d'agents toxiques. Pénurie d'espace et de moyens, ressources naturelles à bout de souffle et demande de produits agricoles en constante augmentation, les habitants des banlieues d'Afrique de l'Ouest tentent d'inventer une nouvelle forme de recyclage et de valorisation des déchets. Néanmoins, les spécialistes le savent, les sols sont des systèmes biogéochimiques complexes et ces pratiques risquent fort de les altérer. Reste à mieux comprendre ces transformations pour en déduire des procédés susceptibles de permettre l'utilisation des rejets urbains en préservant les sols.

Contacts

Ezékiel Baudoin, UR SeqBio
ezekiel.baudoin@ird.sn
Aliou Guissé
alguisse@sentoo.sn
Yacine Ndour, Isra/Lemsat
yacine.ndour@ird.sn
Dominique Masse, UR SeqBio
masse@ird.mg